MARCIO MAIA VILELA

ESTUDO DE MÉTODO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAR A POTENCIALIDADE DO USO DE ENERGIA GEOTÉRMICA A BAIXA PROFUNDIDADE

Trabalho apresentado ao programa Interunidades de pós-Graduação em Energia – (EP/FEA/IEE/IF) da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Doutor em Energia.

Orientador: Prof. Dr. Ualfrido Del Carlo

SÃO PAULO
2004

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO OU PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE

Vilela, Marcio Maia

Estudo de método experimental para determinar a potencialidade do Uso de energia geotérmica a baixa profundidade 278p.:fig.

Tese (Doutorado) – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo

1 - Energia Geotérmica; 2 - Troca Térmica com o solo; 3 - Difusividade Térmica; 4 - Temperatura do Solo

Esta versão difere da tese depositada e aprovada na defesa, à qual foram incorporadas modificações sugeridas pela comissão examinadora, devidamente verificadas e aprovadas pelo orientador

Agradecimentos

A idéia inicial era fazer um agradecimento genérico a todos, mas depois do primeiro nome, os outros acabam aparecendo inevitavelmente. Espero que me perdoem se cometer alguma injustiça esquecendo alguém. Então, lá vai: Ao Prof. Ualfrido pela orientação. Ao Prof. Fagá e Prof. Zerbini pelas discussões e sugestões pertinentes. Aos Prof. Chiquinho e Fernando, do IAG, pela inestimável ajuda nas medidas geofísicas. Ao Prof. Kazuo Ueta e Prof. Nemitala, do DFN-IF por terem ajudado a debulhar a física-matemática de um dos anexos. Ao Cláudio e todos os amigos do laboratório didático do IF pelos equipamentos emprestados. Ao pessoal das oficinas do DFN e Van Der Graaf e aos técnicos do Pelletron pelo suporte. Ao Serginho, sempre disposto a ajudar, com suas ponderações, a superar as crises. Novamente ao Serginho e Silvia, que mesmo abarrotados de trabalho, ajudaram na revisão. Ao Julinho McDonald pela presteza. À Rosana pela força constante. Ao Alexandre pelos bandejões filosóficos. À Cristina, Federico, Ivo, Fernando e todos aqueles que sofreram e sorriram juntos. Enfim, a todos pela amizade, me suportando durante esta longa jornada (e também aqueles que não suportaram...) e já não agüentavam mais ouvir falar em trabalho de doutorado, meus sinceros agradecimentos.

À banca examinadora, em especial à Profa. Dra. Maria Akutsu e Prof. Dr. Adnei Melges de Andrade pelas pertinentes sugestões dadas à redação final deste trabalho.

Este trabalho foi impresso em papel reciclado

O MELHOR DE CALVIN/*Bill Watterson*

QUANTO MAIS VOCÊ TEM CONHECIMENTO, MAIS DIFÍCIL É TOMAR DECISÕES.
QUANDO VOCÊ SE TORNA INSTRUÍDO COMEÇA A REPARAR NAS SUTILEZAS E NUANCES DAS COISAS.
E VOCÊ SE APERCEBE DE QUE NADA MAIS É SIMPLES E CLARO COMO VOCÊ PENSAVA. EM ÚLTIMA ANÁLISE, O CONHECIMENTO NOS TOLHE E PARALISA.
E COMO EU SOU UMA PESSOA DE AÇÃO, NÃO VOU NEM CORRER ESSE RISCO.
IGNORANTE, MAS ATUANTE.

R E S U M O

O conhecimento das propriedades termofísicas do solo é fundamental para o dimensionamento de sistemas de condicionamento de ambiente conectados a trocadores de calor posicionados no subsolo – também conhecidos como sistemas de condicionamento geotérmicos.

Para a realização do estudo destas propriedades, foi montado um sistema de aquisição de dados que permitiu a monitoração do comportamento térmico do solo ao longo de um ano. Estes dados associados à coleta de amostras de solo possibilitaram o cálculo dos valores destas propriedades termofísicas.

Foi estudada a influência destas propriedades sobre as equações de dimensionamento de um sistema hipotético de troca térmica com o solo e estabeleceu-se uma seqüência de procedimentos que contribuem para avaliação e dimensionamento de sistemas de condicionamento geotérmicos.

ABSTRACT

The main factor to design closed-loop using the ground as a heat source and/or sink, often referred as Ground Source Heat Pump Systems (GSHP), to space conditioning are the knowledge of the ground thermophysics properties.

An equipment to field-measured values of soil temperatures were used to calculate and to study the thermophysics properties of soil during one year.

The thermophysics properties influence on Kelvin Line Source Equation was studied and procedures to evaluate and design of GSHP were described.

Sumário

Página

Introdução 21
i.1) Proposta Original 21
O laboratório do IEE-USP 22
i.2) Propostas 24
Grupo 1 24
Grupo 2 25
Grupo 3 25
Grupo 4 26
Grupo 5 26
Grupo 7 26
i.3) O estudo da eficiência energética e conforto ambiental 26
i.4) Propostas Implementadas I.8

Capítulo 1 Aspectos Gerais 31
1.1) Energia Geotérmica 31
1.2) Comportamento Geral da Temperatura no Subsolo 33
1.3) Uso da Energia Geotérmica de Baixa Densidade Energética 36
1.4) Uso da Energia Geotérmica em Sistemas de Condicionamento de Ambiente 37

Capítulo 2 O Solo e Suas Propriedades Termofísicas 43
2.1) O Solo 43
2.1.1) Transferência de Calor por Condução 43
2.2) Propriedades Térmicas do Solo 45
2.2.1) Capacidade Térmica (volumar) 45
2.2.2) Condutividade Térmica do Solo 45

2.2.3) Difusividade Térmica 46
2.3) Classificação de Solo e Rochas 46
2.4) Relação entre propriedades termofísicas e o dimensionamento de trocadores de calor no subsolo 48
2.5) Comportamento das Propriedades Termofísicas com as Frações Volumétricas de Umidade, de Sólido e de Ar 52
2.6) Influência dos valores obtidos das propriedades termofísicas nas Equações de Dimensionamento de GSHP 56
2.7) Métodos para obtenção da Difusividade 58

CAPÍTULO 3 Sistema Aquisição e Equipamentos Experimentais para Coleta de Dados 61
3.1) Sistema de Aquisição de Dados de Temperatura e Locação dos Termômetros 61
3.1.1) Calibração dos Termômetros 62
3.1.2) Instalação dos termômetros 63
3.1.3) Medidas de Temperatura 68
3.2) Curvas de Temperatura do Ar fornecidas pelo IAG 70
3.3) Cálculo de Condutividade e Difusividade pelo método da Agulha de Prova 72
3.3.1) Arranjo Experimental 75
3.3.2) Cálculo da Densidade da Amostra de Solo do IEE-USP 80
3.3.3) Calor específico do solo 81
3.3.3.1) Arranjo Experimental 84

CAPÍTULO 4 Resultados Obtidos 87
4.1) Temperatura do Solo 87
4.2) Curva de Temperatura ambiente fornecida pelo IAG 91
4.3 Cálculo de difusividade do solo pelo método de "onda de calor" 92
4.3.1) Por Atenuação da Onda 92
4.3.2) Por Deslocamento de Fase 93
4.3.3) Ajuste de curva por Chi quadrado 94
4.4) Medidas de Condutividade e Difusividade Térmica do Solo pelo Método de Agulha de Prova, Densidade (por gravimetria) e Calor Específico (pelo Calorímetro) 96

4.4.1) Condutividade Térmica 96
4.4.2) Cálculo da Densidade da Amostra de Solo do IEE-USP 101
4.4.3) Calor Específico do Solo 101

CAPÍTULO 5 Análise e discussão de resultados 107
5.1) Aquisição de Dados 107
5.2) Resultados Obtidos 109
5.2.1) Medidas de Laboratório 109
5.2.2) Medidas de difusividade térmica 111
5.3) Dimensionamento do sistema de troca térmica imerso no solo a partir do valor de difusividade térmica obtido experimentalmente 112
5.4) Construção de funções de correlação entre α e C 113
5.4a)Em θ (fração de água) 114
5.4b) em v_s (fração sólida) 118
5.4c)Em função de n_a (fração de ar) 119
5.4d) Combinação de todos os fatores 120
5.5) Potencial de Condicionamento 120
5.6) Método para Avaliação de Potencial de Troca Térmica com o Solo 124

CAPÍTULO 6 Conclusões e Propostas de Continuação do trabalho 125
6.1) Conclusões 125
6.2) Propostas de Continuação do trabalho 128

CAPÍTULO 7 REFERÊNCIAS 129

Apêndice A Propostas de Sistems para condicionamento de Ambiente e Sistemas 143
Apêndice B BOMBAS DE CALOR ACOPLADAS AO SOLO – Uma Revisão – 185
Apêndice C Dimensionamento de sistemas GSHP 229

Lista de Figuras

Figura página

Figura i.1 Prédio1 para uso dos professores de Pós-Graduação 22
Figura i.2 Prédio 2 Para uso do INFOENER 23
Figura i.3 Prédio 3 Salas de Aula 23
Figura 1.1 Perfil de temperatura do solo com relação à profundidade do solo 32
Figura1.2 Dependência da amplitude de variação de temperatura com a profundidade na cidade de Ottawa, Canadá 34
Figura 1.3.a Variação de Temperatura do solo, medido nos EUA 35
Figura 1.3.b Senóides de temperatura em várias profundidades, a partir da superfície, mostrando os deslocamentos dos máximos com a profundidade 35
Figura 1.4 Temperaturas médias anuais do solo e amplitudes, medidos nos EUA 41
Figuras 2.1 Conteúdo de água no arranjo TDR (Time Domain Reflectrometry) 52
Figuras 2.2 Perfil de conteúdo de água no período de interesse em dois arranjos distantes 0,4m um do outro 53
Figura 2.3a Efeito do tratamento de solo (loam) para cultivo sobre a condutividade térmica do solo em função da umidade, a uma profundidade de 20 cm. 54
Figura 2.3b Efeito do tratamento de solo (clay loam) para cultivo sobre a condutividade térmica do solo em função da umidade, a uma profundidade de 20 cm. 54
Figura 2.4 Comportamento da condutividade Térmica (aqui chamada de λ), capacidade térmica (C) e difusividade térmica (α) em função da água (θ); sólidos (ν_s) e ar (ν_a) presentes no solo para 4 tipos de solo de textura média 55
Figura 2.5 Variação percentual de I(X) em função da variação de α 57
Figura 2.6 Comportamento de $(T-T_0)$ em função da difusividade 59
Figura3.1 Fonte de tensão e placa de aquisição de 8 canais 61
Figura 3.2 Equipamento utilizado para calibração dos termômetros 62
Figura 3.3 Reta de calibração, termômetro 1 64
Figura 3.4 Reta de calibração, termômetro 2 64
Figura 3.5 Reta de calibração, termômetro 3 64

Figura 3.6 Reta de calibração, termômetro 4 .64
Figura 3.7 Reta de calibração, termômetro 5 65
Figura 3.8 Reta de calibração, termômetro 6 65
Figura 3.9 Reta de calibração, termômetro 7 65
Figura 3.10 Reta de calibração, termômetro 8 65
Figura 3.11 Dispersão dos termômetros eletrônicos em comparação com o termômetro de Hg 67
Figura 3.12 Desenho esquemático do posicionamento dos sensores de temperatura. 68
Figura 3.13 Perfil de T x tempo (uma medida a cada 15 minutos) durante 2 dias 69
Figura 3.14 Pontos experimentais de temperatura ambiente obtidos pelo sensor instalado sob a copa da árvore próxima à sala 8 do prédio dos alunos do PIPGE comparado com a curva teórica esperada $\left(T = A + B\,\mathrm{sen}\left(\frac{\pi}{2} + \frac{2.\pi.t}{P}\right)\right)$, onde A = 21^0C; B = 5^0C; P = período de um ano ou 365 dias e t= tempo 71
Figura 3.15 Temperatura média diária do ambiente medido no IAG-USP Água Funda entre 1997 e 2000 72
Figura .3.16 Arranjo da agulha de prova 73
Figura 3.17 Arranjo eletrônico associado ao thermistor .73
Figura 3.18 Esquema de aquecimento da agulha de prova 74
Figura 3.19 Distribuição espacial dos furos de medida da condutividade e difusividade térmica do solo do IEE-USP 76
Figura 3.20 Curva de calibração do termômetro ECIL e seus parâmetros de ajuste 77
Figura 3.21 Arranjo experimental para calibração do thermistor NTC (banho-maria HAAKE NK22) 77
Figura 3.22 Curva de calibração em T do Thermistor 79
Figura 3.23 Arranjo esquemático do equipamento para medida de calor específico (laboratório de geofísica do IAG-USP) 84
Figura 3.24 Fotografia do equipamento de medição de calor específico 85
Figura 3.25 Detalhe do Calorímetro utilizado, juntamente com o thermistor 85
Figura 4.1a Perfil de T x t nos oito sensores de temperatura distribuídos no solo e no prédio doa alunos do PIPGE – 1ª parte 88

Figura 4.1b Conjunto de dados do segundo terço do período 88
Figura 4.1c Terceira parte do conjunto de dados 89
Figura 4.2a Perfil de T x tempo em 3 profundidades de solo e o comportamento da temperatura do ar externo 89
Figura 4.2b Perfil T x t em 3 profundidades do solo e o comportamento do ar externo 90
Figura 4.3 Medidas experimentais da evolução da temperatura do solo do IEE, a 2 metros de profundidade 90
Figura 4.4 Curva "alisada" das medidas de temperatura fornecidos pelo IAG-USP-Água Funda, com média móvel de 30 dias 91
Figura 4.5 Superposição dos dados experimentais de temperatura ambiente obtidos no IAG-USP com os obtidos no subsolo do IEE-USP a 2 metros de profundidade 92
Figura 4.6 Temperaturas mínimas do ambiente (IAG_USP Água Funda) em 23/05/97 e do subsolo a 2 metros de profundidade do IEE-USP em 22/08/97 (devido ao atraso e atenuações inerentes) 93
Figura 4.7 Ajuste de curva senoidal por chi quadrado feito pelo programa ORIGIN para a temperatura ambiente IAG-USP 94
Figura 4.8 Ajuste de curva senoidal por chi quadrado feito pelo programa ORIGIN para a temperatura do solo a 2m IEE-USP 95
Figura 4.9 Superposição das curvas e ajustes senoidais de Tambiente e Tsolo a 2 metros 95
Figura 4.10 Gráfico de Temperatura(k) x t(s) obtido pelo thermistor NTC na ponta de prova em 3 medidas seqüenciais no furo #1 e respectivas funções das assintotas 98
Figura 4.11 Gráfico de Temperatura(k) x t(s) obtido pelo thermistor NTC na ponta de prova em 2 medidas seqüenciais no furo #2 e respectivas funções das assintotas 98
Figura 4.12 Gráfico de Temperatura(k) x t(s) obtido pelo thermistor NTC na ponta de prova 2 medidas seqüenciais no furo #3 e respectivas funções das assintotas 99
Figura 4.13 Gráfico de Temperatura(k) x t(s) obtido pelo thermistor NTC na ponta de prova 1 medida no furo #4 e respectiva função da assíntota 99
Figura 4.14 Gráfico de temperatura (k) x t(s) obtido pelo thermistor NTC na ponta de prova – 2 medidas no furo #5 e respectivas funções das assintotas 100

Figura 4.15 Curva de Temperatura em função do tempo em um calorímetro com amostra de Sílica submetida a aquecimento por Efeito Juole pr 15 minutos 103
Figura 4.16 Curva de Temperatura em função do tempo em um calorímetro com amostra de Solo submetido a aquecimento por Efeito Juole pr 15 minutos 104
Figura 5.1 Comportamento de $(T-T_0)_\theta$ em função da difusividade térmica, onde θ é a fração de água do solo 107
Figura 5.2 Comportamento de $(T-T_0)_{vs}$ em função da difusividade térmica, onde v_s é a fração volumétrica de sólido no solo 108

Figura 5.3 Comportamento de $(T-T_0)_{na}$ em função da difusividade térmica, onde n_a é a fração volumétrica de ar no solo 109
Figura 5.4 Carta Bioclimática adotada em S. Paulol, construída sobre o diagrama psicométrico 111
Figura 5.5 Região de conforto térmico (termômetro de bulbo seco) envolvendo as curvas de temperatura do ar e do solo a 2 metros de profundidade 112

Lista de Tabelas

 # Tabela **página**

Tabela 1.1 – Usos mais comuns da energia geotérmica de baixa temperatura nos EUA 32
Tabela1.2 Profundidade de penetração dos ciclos diário e anual de temperatura para diferentes tipos de solo 36
Tabela 2.1 Valores de densidade, calor específico e capacidade térmica para algumas substâncias 45
Tabela 2.2: Condutividade térmica para ar e água (líquida e gelo) 45
Tabela 2.3 – propriedades termofísicas de alguns materiais encontrados no solo 50
Tabela 2.4a Valores típicos de propriedades termofísicas de alguns tipos de solo 50
Tabela 2.4b. – continuação Valores típicos de propriedades termofísicas de alguns tipos de solo com e sem umidade e incluindo também rocha e concreto 21
tabela 3.1 dispersão dos termômetros digitais em relação ao termômetro de Hg 66
Tabela 3.2 – Dados de calibração fornecidos pelo fabricante do termômetro 76
Tabela 3.3 - Calibração em T do Thermistor NTC 78
Tabela 4.1 – Temperatura do solo em função do tempo fornecido pela agulha de prova em 5 pontos diferentes no IEE-USP 97
Tabela 4.2 Dados de temperatura obtidos no calorímetro a partir de uma amostra padrão de Sílica e do Solo do IEE-USP para cálculo de calor específico 102
Tabela 5.1 Formas de controle climático sobre a carta bioclimática 121

INTRODUÇÃO

Originalmente, este trabalho é parte de uma proposta maior, chamada de EMA XXI, submetida ao IEE-USP durante a construção dos prédios em madeira de reflorestamento que serviriam de sede do Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE), dentro deste Instituto. Os prédios seriam utilizados como Laboratório de Conforto Ambiental e as intervenções realizadas ao longo do tempo que se mostrassem eficientes seriam incorporadas à estrutura dos prédios.

i.1) Proposta Original

Seguindo uma tendência mundial levada pela necessidade de um melhor aproveitamento tanto do espaço físico quanto da energia necessária à manutenção do bem estar dos usuários, o estudo das condições de conforto para o ser humano no ambiente construído tem se desenvolvido bastante no Brasil. Em particular o estudo do conforto térmico e luminoso, com a necessária difusão dos resultados aos profissionais da área e à sociedade em geral têm se mostrado de grande importância, pois não raro as edificações construídas apresentam problemas de umidade excessiva, falta de ventilação, iluminação natural quase ausente, temperaturas excessivamente altas ou excessivamente baixas, demonstrando assim a falta de condições mínimas de conforto e causando problemas de saúde para os usuários e deterioração das construções.

Com a reorientação, por parte de setores da sociedade, da política de produção e consumo energia, em particular de eletricidade, causada principalmente pela escassez de recursos, tem-se buscado uma maior eficiência no uso desta matéria prima, justificando o surgimento, inclusive dentro das Universidades, de laboratórios de pesquisa que se dedicam exclusivamente ao estudo dos problemas relacionados ao conforto ambiental e conservação de energia.

O Laboratório do IEE-USP

Foi proposta a implantação de um programa de conservação de energia em edificações no Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo -IEE-USP- tendo como meta o desenvolvimento de pesquisas em projetos de arquitetura bioclimática, equipamentos para conservação de energia (como por exemplo, sistemas de aquecimento e refrigeração) e minimização do impacto ambiental, cujo objeto de estudo é um conjunto de três prédios com estrutura de madeira de reflorestamento –eucalipto-, construídos dentro do próprio Instituto:

1 de baixa densidade ocupacional, ocupado pelos professores do Programa de Pós-Graduação em Energia – posteriormente ocupado pelos alunos do programa - (prédio 1, figura i.1)

1 de média densidade ocupacional, ocupado pelo INFOENER, um banco de dados de Energia cuja função é concentrar e suprir a sociedade com informações da área energética. (prédio 2, figura i.2)

1 de alta densidade ocupacional a ser utilizado por salas de aula do Programa de Pós-Graduação em Energia. (prédio 3, figura i.3).

Figura i.1 prédio1 para uso dos professores de Pós-Graduação

Figura i.2 prédio 2 Para uso do INFOENER

Figura i.3 prédio 3 Salas de Aula

Os três prédios têm características construtivas semelhantes:

-eucalipto tratado com produtos químicos especiais para assegurar sua durabilidade.

-base em sistema plataforma, suspenso por pilotis, deixando os prédios suspensos à altura de 1 metro, impedindo o contato com a umidade do solo.

-paredes ocas, tipo “balloon frame”, madeira na parte externa e placa de gesso na parte interna, 11,5 cm de espessura toral.
-proteções solares de face norte e sul -beiral na face norte e corredor com parede protetora na face sul- como forma de atenuar os efeitos de aquecimento direto das paredes por raios solares e evitar o surgimento de fungos devido ao contato da água de chuva com o madeiramento das construções.

Com estas construções é possível fazer uma abordagem da questão construtiva em conjunto com o enfoque energético:
1) Economia de energia na construção, uso e manutenção da edificação, com redução do impacto ambiental pela utilização de materiais construtivos com menor quantidade de energia agregada industrialmente; redução de entulho; reutilização e/ou reciclabilidade dos materiais.
2) Manutenção do conforto ambiental com baixo custo energético
3) Alta qualidade do produto com baixo custo financeiro.

A abordagem da questão energética em prédios é sistêmica, devendo aproveitar e controlar a energia consumida com todos os recursos necessários. Em geral deve-se atacar várias frentes, como é o caso da iluminação associada ao controle de temperatura, umidade, ventilação e radiação solar. Mesmo quando tratamos apenas de um parâmetro, soluções combinadas podem produzir resultados mais eficientes que soluções individuais. Por isto a proposta de vários sistemas, alguns complementares e outros concorrentes, como forma de minimizar o consumo de energia:

i.2) PROPOSTAS

A proposta de trabalho foi divida em 6 grandes grupos, com intenção de cobrir todas as áreas de interesse (no Apêndice A “PROPOSTAS DE SISTEMAS PARA CONDICIONAMENTO DE AMBIENTE E SISTEMAS COMPLEMENTARES” há um detalhamento destes tópicos):

GRUPO 1 : REDUÇÃO DA ENERGIA INCIDENTE SOBRE AS CONSTRUÇÕES

1.1) Redutores de radiação solar incidente: orientação do edifício; protetores solares de face norte e corredor de face sul

1.2) Estudo da refletância solar e emissividade de infravermelho na face interna do telhado dos prédios como forma de redução da carga térmica nos interiores

1.3) Uso de barreira radiante sobre o forro

1.4) Filtro de radiação luminosa, com corte do infra-vermelho de parte do visível.

1.5) Sistema de ventilação de ar independentes, no interior das salas e no forro

1.6) Dimerização da iluminação natural e artificial

GRUPO 2 : CONDICIONAMENTO DO AMBIENTE INTERNO

2.1) Sistema de troca térmica com o solo, denominado Bomba de Calor com fonte térmica no solo ou, em inglês: *Ground-Source Heat Pump*, que denominaremos GSHP

2.2) Sistema de troca de calor por evaporação, para refrigeração do prédio número 2

2.3) Painéis fotovoltaicos associados a mini-ventiladores e bomba d'água para o sistema GSHP

2.4) Caixa de pedras para depósito de calor/frio

2.5) Uso de material isolante termo-acústico (lã de rocha) no interior das paredes do prédio 3, de salas de aula.

2.6) Construção do lago-reservatório de água de chuva para consumo em sanitários, e no sistema de refrigeração por evaporação. Painéis fotovoltaicos para movimentação de bomba d'água do lago (caixas d'água e oxigenação)

GRUPO 3 : SISTEMAS DE CONTROLE DE EQUIPAMENTOS

3.1) Sistema de controle automático assistido por computador para aumento da eficiência energética dos equipamentos instalados no prédio:

- Sistema de aquecimento
- Sistema de ventilação
- Sistema de ar condicionado
- Sensores de presença

- Sistema de controle de iluminação artificial e natural
- fechaduras eletrônicas
- Integradores de consumo de energia
- lâmpadas de baixo consumo energético e alta eficiência

GRUPO 4 : SISTEMA DE COMBATE A INCÊNDIO

4.1) Uso do lago artificial como parte do sistema de combate a incêndio do conjunto arquitetônico. Água coletada de chuva; sistemas de detecção de incêndio.

GRUPO 5 : ENSINO E DIVULGAÇÃO

5.1) Criação do Centro de Estudos de Energia Aplicada ao Setor de Construção e Meio-Ambiente – (**EMA** – XXI)

GRUPO 6 : CONSTRUÇÕES COMPLEMENTARES

6.1) Construção de oficina de suporte ao projeto e montagem da sala de controle e segurança predial.

GRUPO 7 : SISTEMAS DE AQUISIÇÃO DE DADOS

7.1) Levantamento detalhado do sistema de aquisição de dados necessário para monitoração de todas as variáveis necessárias ao nosso estudo – executado pelo colaborador Gianfranco M. Polga.

i.3) O ESTUDO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E CONFORTO AMBIENTAL

A preocupação com estes aspectos está presente em todo o mundo, pois a relação entre a produção de energia, com todo o ônus incorporado e seu consumo sem critérios tem provocado um aumento desproporcional nos gastos com geração e distribuição de energia,

bem como um impacto ambiental ainda não totalmente contabilizado, mas seguramente de grandes proporções (como o aquecimento global). Na Alemanha, desde o início dos anos 80, um consórcio entre o Governo Federal e a Associação dos Carpinteiros Alemães vem trabalhando no programa "Cost-efficient Buildings" e como produto deste consórcio, Borsch-Laaks and Pohlmann (**Bor-96**) desenvolveram um projeto de construtivo chamado "Casa com triplo E: Eficiência energética, Econômica e Ecológica", onde são apresentados vários conceitos de arquitetura de construções de baixo consumo energético com manutenção do conforto interno. A simples substituição, sem alteração do projeto arquitetônico original tem demonstrado que se pode obter economia significativa de energia.

No trabalho de Elberling et al. (**ELB-96**) foram avaliadas quatro residências, três prédios comerciais e um sítio agrícola, obtendo redução de consumo de energia, sem abrir mão do conforto, da ordem de 60%. Elizabeth Titus (**TIT-96**) por sua vez, fez um estudo mais detalhado deste comportamento, utilizando como estudo um grupo de 26 casas selecionadas. Não somente o acompanhamento do consumo pós-alteração da residência foi efetuado, mas também o impacto destas alterações nos hábitos dos moradores, onde se verificou o surgimento de novas necessidades e novos procedimentos - como a instalação, por parte dos moradores, de equipamentos não previstos e/ou a dificuldade de adaptação com equipamentos já instalados-.

A simples substituição de equipamentos por outros mais econômicos, modificação estrutural das paredes, etc, não garante o máximo de economia de energia. Tem-se que levar em conta também os hábitos -ou a mudança de- dos moradores. Por isto a conclusão de Titus, de economia de eletricidade da ordem de 25%, em contraste com os valores verificados por Elberling. Como diz a autora: "Tecnologias inovativas, tais como termostatos fotossensíveis e bombas térmicas para aquecimento de água domestico, não são apropriados para todo o tipo de usuário. As tecnologias devem ser compatíveis com o estilo de vida dos ocupantes".

A maioria dos conceitos apresentados na literatura são válidos para países de clima temperado e as propostas não são integralmente aplicáveis ao Brasil, onde o clima tropical (e/ou equatorial) determina necessidades de condicionamento diferentes dos países de clima temperado/frio.

As características físicas devido ao processo construtivo aplicado nos prédios do PIPGE apresentam comportamento diferente das construções tradicionais, como por exemplo, uma resposta rápida do ambiente interno às variações climáticas externas -devido à baixa capacidade térmica e baixa inércia térmica-, que provoca um deslocamento da região de conforto térmico que deve ser compensada com a utilização de equipamentos disponíveis no mercado, como os sistemas de ar condicionado tradicionais, grandes consumidores de energia elétrica, ou por meio do desenvolvimento de dispositivos de baixo consumo de energia e baixo custo de fabricação e manutenção. A baixa capacidade térmica associada à boa isolação térmica sugere condicionamento com trocadores de calor de baixa potência, o que precisa ser confirmado experimentalmente.

Também no sistema de iluminação zenital -aberturas existentes no teto das construções, permitindo a penetração da luz- e na iluminação lateral das fachadas leste, sul e norte, o projeto supõe iluminação natural suficiente para atender às necessidades de iluminação matinal em dias de céu encoberto. Estas aberturas acabam por provocar uma quantidade excessiva de luz durante uma parte do dia -no período de sol no zênite-, com o conseqüente desconforto luminoso, além do desconforto térmico, uma vez que a clarabóia contribui para aumentar o calor no interior das construções.

i.4) Propostas Implementadas

Para o presente trabalho, a proposta fundamental de todo o conjunto apresentado no item **i.2** é a construção do sistema experimental de troca térmica com o solo para condicionamento térmico da sala 8 do prédio ocupado pelos alunos do Programa. A previsão era instalar o sistema experimental de condicionamento de ambiente conectado ao solo e, a partir dele, fazer-se os estudos de materiais, métodos e eficiência do sistema. Com as dificuldades enfrentadas na obtenção de financiamento para a plena instalação e funcionamento do projeto, as metas iniciais foram proporcionalmente se reduzindo e os sistemas e equipamentos projetados não foram instalados. Apenas o sistema de condicionamento evaporativo proposto foi instalado no prédio ocupado pelo INFOENER/CENBIO, ainda assim com problemas oriundos de deficiência de instalação,

causando alto nível de ruído dentro do prédio (problema este ainda não corrigido), fazendo com que o sistema fique praticamente inoperante.

Do sistema de troca térmica com o solo proposto, apenas o sistema de coleta de dados para acompanhamento da evolução de temperatura do solo, do ar externo e da parte interna do prédio entrou em operação, funcionando de forma adequada por aproximadamente 1 ano. Este sistema, que consta de uma placa de aquisição de oito canais obtida por empréstimo do IEE, uma fonte de tensão montada no Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos (LSF-IEE) e um microcomputador 286 disponibilizado pelo Serviço de Informática do Instituto foi responsável pela obtenção dos dados de temperatura do solo apresentados neste trabalho. A falta de padronização, de acordo com os Laboratórios de Meteorologia, do equipamento para coleta dos dados de temperatura externa, forçou a utilização de informações de Temperatura do Ar na cidade de São Paulo fornecidas pelo IAG. Medidas complementares para avaliação das propriedades termofísicas do solo também foram executadas em laboratórios do IAG.

Este trabalho tem como objetivo medir as propriedades termofísicas do solo no IEE-USP, avaliar o impacto que elas causam no dimensionamento de sistemas de troca térmica conectadas ao solo e estudar caminhos que facilitem o desenvolvimento de métodos para dimensionamento destes sistemas.

CAPÍTULO 1 Aspectos Gerais

A utilização do subsolo como fonte e/ou reservatório de calor para sistemas de condicionamento de ambiente leva em conta as propriedades de inércia e capacidade térmica do solo que o caracterizam como bom reservatório (ou fonte) de calor. Estas propriedades variam com sua composição, localização e profundidade. Esta energia térmica estocada -ou retirada- do solo é comumente chamada "Energia Geotérmica".

1.1) Energia Geotérmica

De acordo com Dickinson et al. (**DIC-01**), Energia Geotérmica é definida como a energia térmica contida no interior da Terra que gera fenômenos geológicos em escala planetária, sendo também utilizado para indicar a parte da energia térmica disponível no interior do planeta que pode (ou poderia) ser retirado e explorado pelo homem. Acredita-se (**BUL-73**) que a fonte de energia fundamental seja por decaimento radiativo no interior do planeta. De fato, os modelos mais recentes supõem que há geração contínua de calor no interior do planeta através do decaimento radiativo de isótopos de U^{235}; U^{238}; Th^{232} e K^{40} (**LUB-68**). Somando-se a esta energia radiogênica, outras fontes concorrem em proporções não muitas claras com o aquecimento do interior do planeta (p. ex., a energia primordial devida ao acréscimo de massa do planeta). De qualquer forma, sabe-se desde os anos 80 que o calor gerado no interior do planeta e o calor dissipado da Terra para o espaço não estão em equilíbrio, e que nosso planeta está, em escala geológica, vagarosamente esfriando.

Através do movimento de placas tectônicas e de atividade vulcânica, parcelas desta energia podem concentrar-se perto da superfície do planeta. A energia é também transferida das camadas inferiores da crosta para a superfície por meio de condução e convecção de fluido (em regiões onde exista a presença de água e/ou lava). Devido às variações da atividade vulcânica, decaimento radiativo, condutibilidade das rochas e do fluido circulante, a uma determinada profundidade, diferentes regiões têm diferentes fluxos energéticos (da crosta para a superfície), bem como diferentes temperaturas.

Os valores de gradiente de temperatura com a profundidade comumente encontrados variam tipicamente de 9^0 a 45^0 C para cada 1000 metros, dependendo das características geofísicas da região. Um perfil da temperatura com a profundidade retirado da ASHRAE é mostrado na figura 1.1

A Energia Geotérmica é normalmente classificada como *renovável* e *sustentável*: *Renovável* descreve a propriedade da fonte energética; *Sustentável* descreve o modo como a fonte é utilizada.

Segundo a ASHRAE, os usos de fontes geotérmicas podem ser divididas em três categorias gerais (vide também tabela 1.1):

1)Alta-temperatura (>150^{0}C), usada principalmente para geração de eletricidade. Abaixo desta temperatura, em geral a geração de eletricidade não é economicamente viável.

2)Baixa-temperatura (<150^{0}C), utilizada em aplicações de uso direto, processos que requeiram energia térmica compatível com as temperaturas da fonte geotérmica.

3)Aplicações com bomba de calor acopladas ao solo ou bomba de calor geotérmica (<32^{0}C).

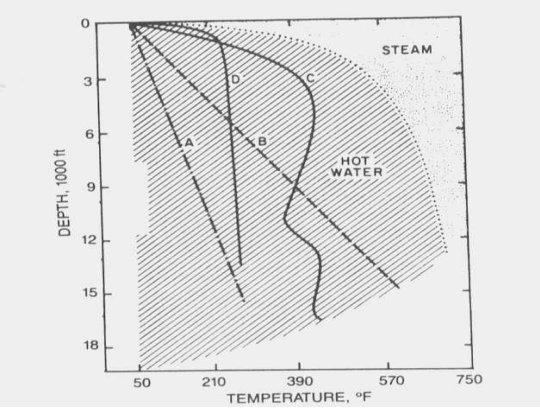


Figura 1.1 - Perfil de temperatura do solo com relação à profundidade do solo **(ASH-95**)

A gradiente de temperatura quase-normal
B Gradiente de alta condutividade
C e **D** Temperatura resultante de fluxo convectivo

A tabela 1.1 (**ASH-95**) mostra alguns usos industriais da energia geotérmica de baixa temperatura nos Estados Unidos.

Tabela 1.1 Usos industriais de Geotermia nos EUA

apliacação	# sistemas	Temperatura da fonte	
		graus F	graus C
aquecimento de esgoto	2	130; 170	54 a 77
lavanderia	4	104 a 181	40 a 83
desidratação de vegetais	1	270	132
crescimento de cogumelos	1	235	113
aquecimento de estufa	37	95 a 210	35 a 99
aquicultura	8	61 a 205	16 a 96
secagem de grãos	1	200	93
degêlo de rodovias	3	47 a 190	8 a 88
lixiviação de terra em mina de ouro	2	186 a 238	86 a 114

Tabela 1.1 – Usos mais comuns da energia geotérmica de baixa temperatura nos EUA

A pequenas profundidades -algumas dezenas ou centenas de metros-, a temperatura do solo sofre influência direta do clima da região, da temperatura média anual do ar, da temperatura do ar na superfície, do tipo de solo, sua umidade e cobertura vegetal, da profundidade e da inércia térmica, além da variação das estações do ano. Pode-se considerar esta fina camada da crosta terrestre como um coletor solar de grande capacidade e grande inércia térmica, armazenando o calor que atinge sua superfície nos dias quentes de verão e perdendo a noite e nos meses frios. A profundidades maiores que 5 ou 6 metros, à temperatura praticamente não muda durante o ano: os valores aproximam-se da temperatura média anual local. A pequenas profundidades (dependendo das características citadas na figura 1, pode situar-se entre dezenas e centenas de metros), esta energia armazenada no solo é chamada de energia geotérmica de fonte solar ou energia geotérmica de baixa densidade energética.

1.2) Comportamento Geral da Temperatura no Subsolo

Em termos gerais, as variações de temperatura do ar e da superfície do solo podem ser descritas pela equação:

$$T_s = \bar{T} + A \cos\left[\frac{2\pi t}{t_o}\right] \tag{1.1}$$

onde: T_s é a temperatura da superfície do solo em um dado instante t

$\bar{T}$ é a temperatura média no período, envolvendo um ou mais ciclos completos

A é a diferença entre a temperatura máxima e mínima da superfície do solo (ou do ar) no período

t é o instante considerado

t_0 é o intervalo de tempo de um ciclo completo

Se o subsolo tem propriedades termofísicas constantes em uma determinada profundidade x, a temperatura induzida ao longo de uma variação cíclica é dada por:

$$T(x,t) = \overline{T} + A \exp\left[-x\sqrt{\frac{\pi}{\alpha t_o}}\right] \cos\left[\frac{2\pi t}{t_o} - x\sqrt{\frac{\pi}{\alpha t_o}}\right]$$

(1.2)

onde: a razão entre condutividade térmica e capacidade térmica: $\alpha = k/C_v$ é chamada de difusividade térmica.

A amplitude da variação de temperatura na superfície do solo é normalmente da mesma ordem de grandeza que a do ar. A equação 1.2 mostra que ela decresce exponencialmente com a profundidade. O comportamento da amplitude de variação média anual de temperatura do subsolo na cidade de Ottawa, Canadá é mostrado na figura 1.2. A profundidades abaixo de 5 metros, a temperatura do subsolo é praticamente constante.

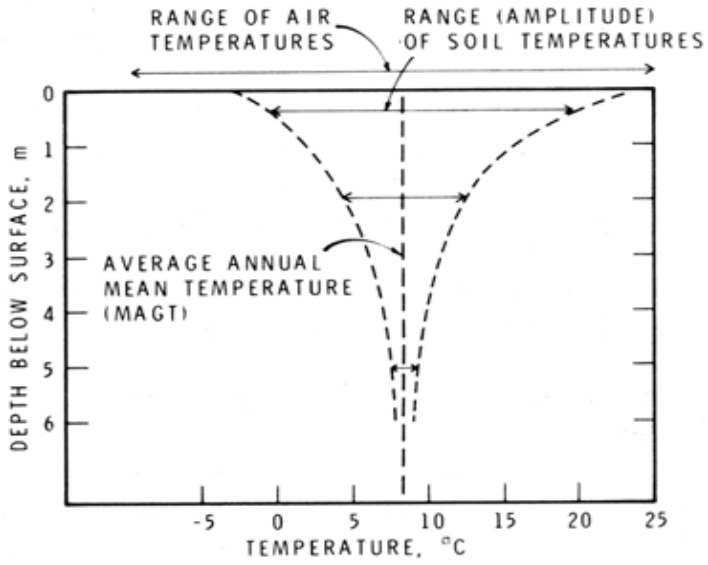


Figura1.2: Dependência da amplitude de variação de temperatura com a profundidade na cidade de Ottawa, Canadá (**WIL-03**)

A temperatura da superfície do solo permanece aproximadamente em fase com o ar. Entretanto, abaixo da superfície os máximos e mínimos ocorrem com atraso no tempo em relação aos valores observados na superfície. O comportamento do atraso com relação à profundidade é dado pelo termo que multiplica o co-seno na equação1.2. A 5 metros, o máximo de temperatura no subsolo acontece da ordem de 6 meses depois de ocorrido na superfície. Na figura1.3.a é mostrada a amplitude de variação anual de temperatura medida nos EUA para alguns tipos de solo, além de mostrar os deslocamentos da senóides de temperatura com a profundidade do solo.

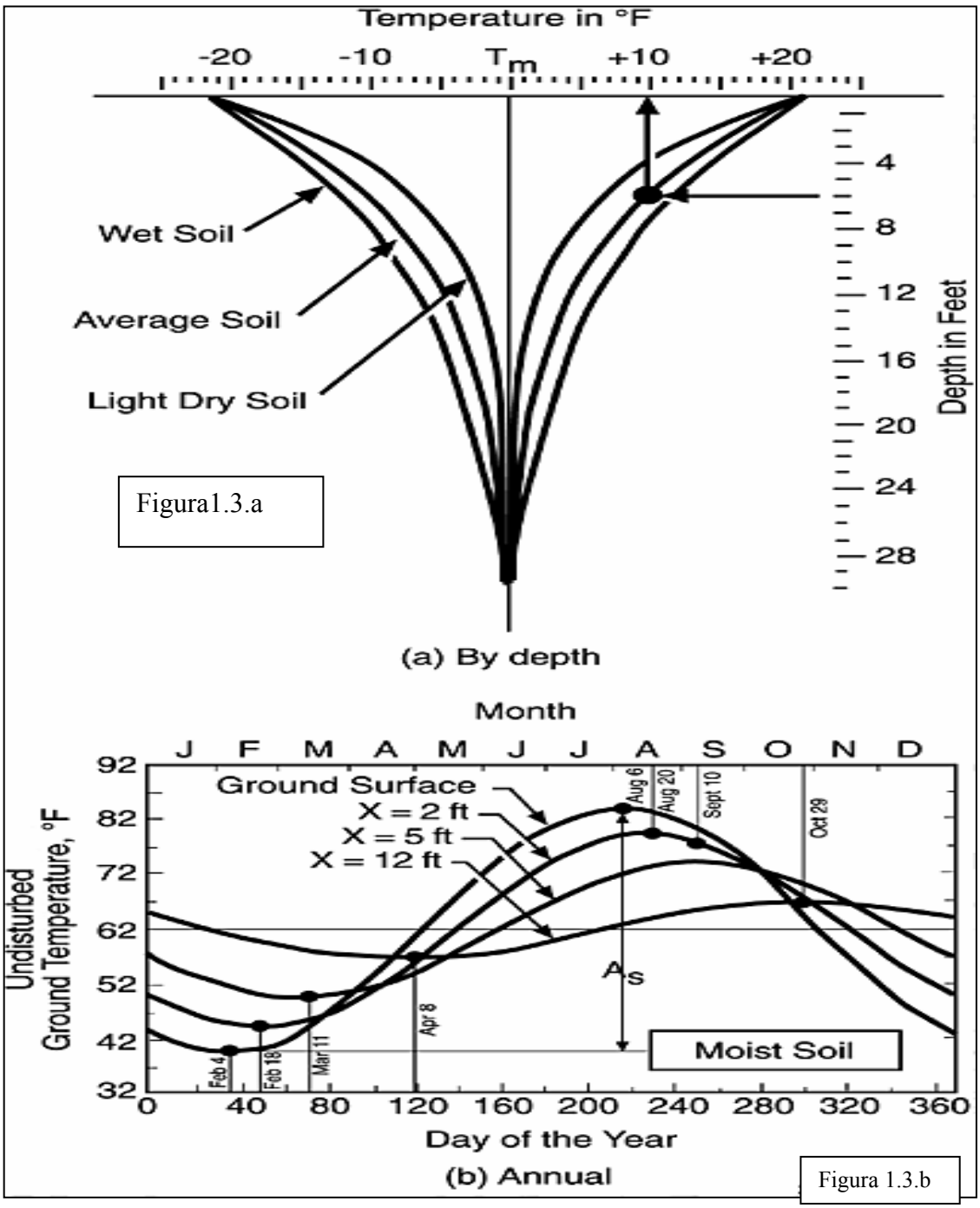


Figura1.3.a

Figura 1.3.b

Figura 1.3.a- Variação de Temperatura do solo, medido nos EUA
Figura 1.3.b – Senóides de temperatura em várias profundidades, a partir da superfície, mostrando os deslocamentos dos máximos com a profundidade (**FED-98**)

Além do ciclo anual de temperatura, o solo é submetido ao ciclo diário e ao associado às mudanças climáticas. Estas variações estão confinadas à proximidade da superfície: os ciclos diários -extremamente importantes nos projetos arquitetônicos e na

agricultura- têm penetração de aproximadamente 0,5m enquanto que o das mudanças climáticas, da ordem de 1 m de profundidade.

Não se tem conhecimento de estudos semelhantes realizados no Brasil, mas espera-se, que, ao menos na região sudeste, de clima tipicamente tropical, a temperatura média do solo seja maior e as amplitudes de variação sejam menores que as observadas nos EUA e Canadá.

A tabela 1.2 apresenta os valores aproximados de penetração (profundidade em que a amplitude cai para um centésimo da amplitude na superfície em que a penetração no ciclo diário é calculada como 7,64 k/C_v e no anual, 19,1 vezes este valor) juntamente com os efeitos provocados pela umidade para alguns diferentes tipos de solo.

	K/C_v cm^2/sec	Penetration Depth Day (m)	Year (m)
rocha	0.020	1.10	20.5
Argila úmida	0.015	0.95	18.0
Areia úmida	0.010	0.80	14.5
Argila seca	0.002	0.40	6.5
Areia seca	0.001	0.30	4.5

Tabela1.2 Profundidade de penetração dos ciclos diário e anual de temperatura para diferentes tipos de solo (**WIL-03**)

1.3) Uso da Energia Geotérmica de Baixa Densidade Energética

O conhecimento das propriedades térmicas do solo tem aplicações em várias áreas de engenharia, agronomia e ciência de solo. A temperatura e umidade do subsolo próximo à fronteira solo-atmosfera governam os fluxos de água e energia de baixo para cima e de cima para baixo que, por sua vez, exercem papel fundamental no balanço global de energia e água e modulam as respostas dos processos biogeoquímicos do solo, como por exemplo a produção de CO_2 (**BEL-03; RIS-02**) e a germinação e crescimento de plantas (**GHA-85)**.

Uma forte dependência da produção de biomassa total em função da temperatura do solo (máximo em torno de 25^0C) e razão de grãos/biomassa total (máximo em torno de 18^0C) foi observada por M.A.Awal et al. (**AWA-03)** em uma plantação de amendoins. Os máximos de concentração de clorofila-a (Chl-a), clorofila-b (Chl-b) e assimilação de CO_2 foram observados a 32^0C nas fases pré-floração e floração e 25^0C nas fases subseqüentes. Huang et al. (**HUA-03) t**ambém

observaram forte dependência da temperatura na germinação de um arbusto comum no noroeste da China (Haloxylon ammodendron), notando uma quase completa perda de germinação das sementes se as condições ideais de temperatura e umidade na época correta não forem observadas.

Na área de hidrologia de meso-escala, o conhecimento detalhado das propriedades termofísicas do solo contribui também para aumentar a eficiência e acurácia dos modelos de Circulação Geral (**MOH-98).**

Na área energética, em especial a de conservação de energia, o solo pode exercer um papel muito importante devido às suas características termofísicas, podendo ser utilizado em sistemas de condicionamento de ambiente como fonte ou reservatório de energia térmica.

1.4) Uso da Energia Geotérmica em Sistemas de Condicionamento de Ambiente

Equipamentos de condicionamento de ambiente constituídos de bombas de calor conectados a grandes reservatórios térmicos têm ganhado importância nos países desenvolvidos, devido à característica de economia no consumo de energia elétrica e do menor custo de ciclo de vida do equipamento. Estes sistemas, apesar dos custos de implantação maiores, economizam em média 30% da energia elétrica necessária ao funcionamento de um sistema de condicionamento tradicional em que as trocas térmicas são feitas diretamente no ar -os chamados sistemas ar-ar-,.

O apoio e incentivo dos órgãos federais, como DOE e NREL, garantiram nos EUA mais de 1 milhão de sistemas implantados. No caso do sistema elétrico americano, que destina aproximadamente metade da energia gerada para processos que envolvam aquecimento e/ou refrigeração de materiais, substâncias ou ambiente, esta economia de energia é apreciável.

A ocorrência de sistemas de condicionamento acoplados ao solo dá-se principalmente em países com invernos rigorosos -e mais alto poder aquisitivo-, como EUA e alguns países da Europa sendo usados principalmente para aquecimento – mas não exclusivamente - e, até o momento, não há disponibilidade na literatura de nenhum relato de sistemas de condicionamento de ambiente acoplados ao solo no Brasil.

A conexão entre a bomba de calor e o solo é feita através de redes de tubos (polietileno ou polibutileno), por onde passa um líquido, geralmente água, que conduz a energia térmica retirada -ou depositada- no solo -ou no ambiente construído-.

Devido à grande capacidade e inércia térmica, o solo atua como um amortecedor e retardador das variações de temperatura do ambiente, servindo, desta forma, como fonte de calor nos meses frios e depósito de calor nos meses quentes. Um resumo do estado da arte do funcionamento dos dispositivos e seu acoplamento com o solo são feitos no **apêndice B:** "Bombas de Calor Acopladas ao Solo– Uma revisão".

O projeto de sistemas de tubos trocadores de calor enterrados no solo para fazerem a troca de energia térmica entre o prédio e o solo envolve fatores que dependem da construção (processos construtivos; materiais utilizados; disposição destes materiais; etc), do clima local (insolação; regime de ventos, umidade, etc) e das características do solo (uniformidade, umidade, cobertura vegetal, difusividade, condutividade). Além disto, o projeto de um sistema de troca térmica acoplado ao solo tem um compromisso entre performance e custo. Um grande sistema vertical pode resultar em uma resistência térmica relativamente baixa, resultando em uma temperatura de retorno da água -a água que volta para o interior da construção depois de fazer todo o percurso pelo subsolo- que permita uma boa performance do equipamento. Mas esta boa performance pode implicar em custos elevados de implantação, que acabam por inviabilizar o projeto. Sistemas pequenos, rasos e densos (vários tubos próximos) podem oferecer baixos custos iniciais, mas devido à baixa performance, podem ter um consumo de energia elétrica tão alto que os torna inviáveis quando comparados com sistemas de condicionamento tradicionais. Via de regra, quanto maior o conhecimento das propriedades termofísicas do solo (condutividade, difusividade e calor específico, além de sua densidade), melhor a avaliação do comportamento térmico do sistema.

Nenhum fator isoladamente é mais importante para o sucesso de um projeto de sistema de troca térmica com o solo que a taxa de transferência de energia térmica entre o equipamento de acoplamento e o solo circundante. É ela que define quão próxima a temperatura de retorno do fluido que faz troca de calor estará da temperatura do solo.

Assim, o conhecimento do comportamento térmico do solo ao longo do ano é fundamental no desempenho destes equipamentos de condicionamento ambiental, pois são afetados diretamente pelo potencial de troca entre o fluido de circulação e o solo. As propriedades físicas do solo (composição, densidade, grau de umidade, temperatura, características térmicas) são os principais fatores que determinam o dimensionamento e eficiência destes equipamentos.

Para simplificação, a resistência térmica é descrita como a resistência térmica entre o fluido circulante no tubo enterrado e o solo circundante, incluindo aí o comportamento de todo o sistema no subsolo: fluido, equipamentos de condução e acoplamento (tubos) e solo do entorno. De forma geral, o solo tem um fator dominante na resistência térmica global e por isto esta resistência térmica global às vezes é chamada de resistência do solo ou resistência de campo.

A partir das características de comportamento do solo, do ambiente externo e do ambiente construído, pode-se unir os três num único sistema de forma que se possa fazer uma simulação de condicionamento do ambiente construído e o respectivo comportamento do solo. Naturalmente, a temperatura do subsolo afeta diretamente a taxa de transferência de calor. A temperatura do subsolo varia com a profundidade, clima ao longo do ano, altitude de sua superfície, latitude, propriedades do solo, nível de chuva, condições da superfície do solo, inclusive vegetação, entre outros fatores.

Várias medidas de temperatura do solo estão disponíveis na literatura, inclusive com isotermas construídas, como na figura 1.4, onde é mostrado um levantamento das temperaturas médias anuais do subsolo e das amplitudes das variações realizado nos EUA. A maioria dos pontos coletada para a construção destas isotermas foi obtida a partir da temperatura de saída da água em poços artesianos ou resultado de medidas a profundidades menores que 30 cm e por isto não adequadas ao uso em sistemas de troca de calor conectados ao solo. Medidas de temperatura no subsolo em um local específico só podem ser obtidas através de medidas diretas, embora vários pesquisadores no mundo estejam trabalhando no desenvolvimento de modelos que possam avaliar a temperatura do subsolo em função do local, do dia do ano e da profundidade:

- No Japão, um extenso programa de medida da temperatura do subsolo tem sido implementado pelo Ministério da Educação, Ciência e Cultura em conjunto com o Instituto de Arquitetura para alimentar e complementar uma base de dados de clima chamado AMeDAS (Automated Meteorological Data Acquisition System). Este programa conta com 840 pontos de medições espalhados por todo o país. Cada um deles cobre uma área de 21km^2 (**MAT-99)** com medidas realizadas: na interface solo-ar; a 1 e a 3 metros de profundidade. Entre outros usos, estas medidas são utilizadas para aumentar a acuráciia de um programa de simulação das temperaturas do subsolo que servem de suporte ao dimensionamento de sistemas geotérmicos de condicionamento de ambiente.

- Shonder e Beck **(SHO-00)** desenvolveram um método de determinação local das propriedades físicas do solo baseado em modelo numérico de transferência unidimensional de calor. Para isto é enterrado no solo um tubo dobrado em forma de "U" em que de um lado é fornecida água aquecida e no outro é medida a temperatura de saída. Estimando-se alguns parâmetros, obtêm os valores de condutividade térmica e posteriormente comparam com os valores obtidos através de dois outros métodos (Line Source Method e Cylinder Source Method).
- Estudo sistemático de campo para modelar a relação entre a umidade e condutividade térmica do solo foram executados por Evett (**EVE-94**)
- Anandakumar et al. (**ANA-01)** mediram simultaneamente as temperaturas do solo, subsolo, fluxo de calor no solo, radiação solar; temperatura do ar e velocidade do vento em dois locais de Kalpakkam para estimar os valores de difusividade, condutividade e capacidade térmicas por seis métodos diferentes, entre eles os métodos de Equação de Amplitude e Equação de Fase, que serão utilizados neste trabalho.

Como observado no apêndice B, em algumas situações particulares, quando os sistemas GSHP são comparados aos sistemas tradicionais, os primeiros podem não apresentar uma economia significativa de energia que justifique sua implantação. Condições físicas do espaço que sofrerá condicionamento térmico, hábitos dos usuários, condições climáticas externas e características físicas do solo são fatores que podem inviabilizar o projeto.

Como as propriedades termofísicas são o principal fator no dimensionamento dos sistemas GSHP, elas devem ser avaliadas com muito cuidado. Uma avaliação incorreta pode comprometer todo o dimensionamento do conjunto e tornar economicamente inviável sua implantação. Como se pretendia instalar um protótipo de sistema GSHP na sala 8 do prédio dos alunos do PIPGE, as medidas de propriedades termofísicas do solo seriam executadas durante a perfuração para instalação do sistema. Isto permitiria fazer um mapeamento destas propriedades em toda a região de implantação do equipamento, com o conseqüente ajuste fino das equações de dimensionamento do sistema GSHP. Como não se conseguiu viabilizar sua implantação, foi desenvolvida uma metodologia para medição destas propriedades termofísicas, que depois foram introduzidas nas equações de dimensionamento.

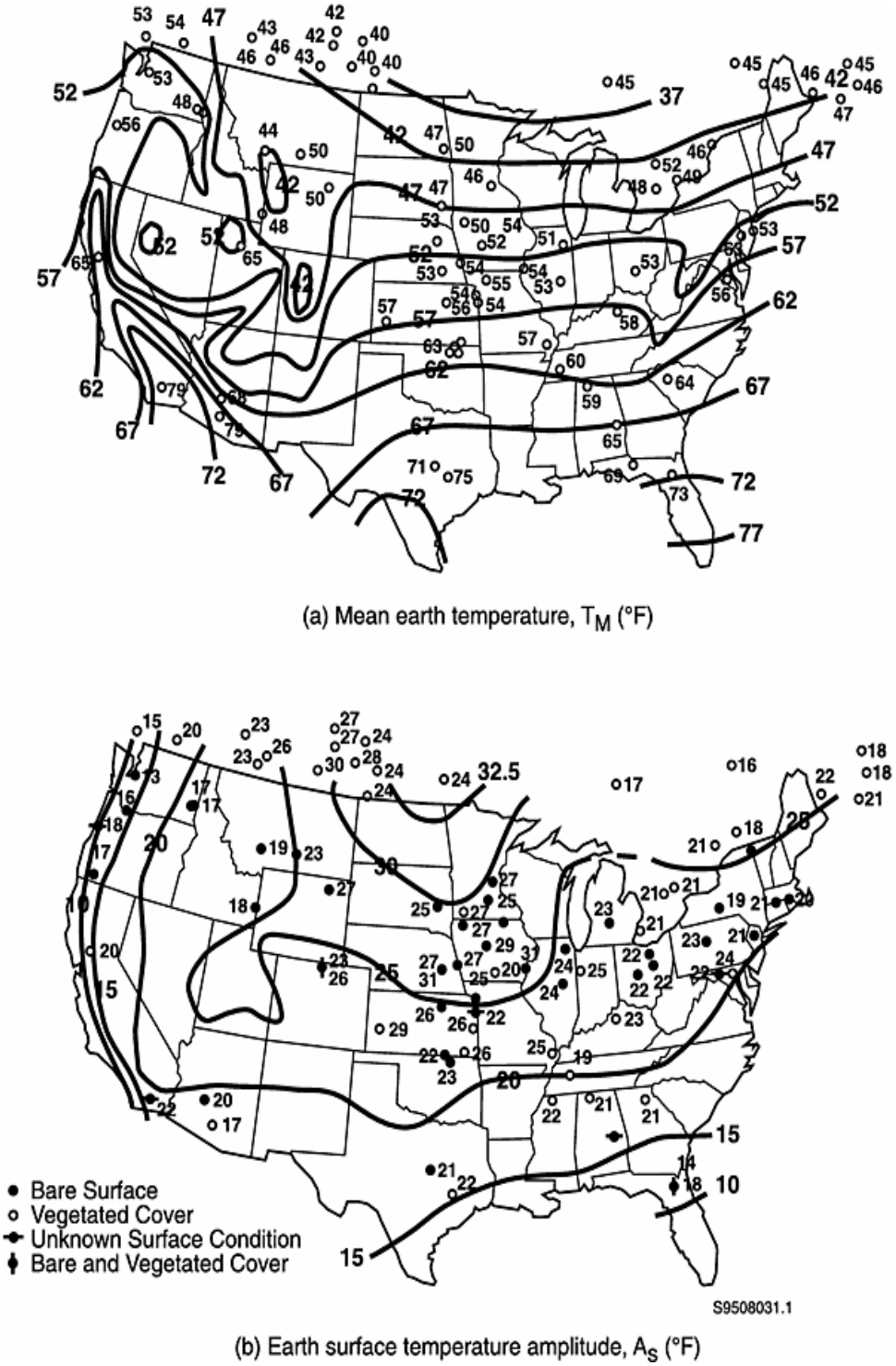


Figura 1.4 Temperaturas médias anuais próximos à superfície do solo e amplitudes, medidos nos EUA (**FED-98**)

Como não foram encontradas informações sobre sistemas GSHP instalados no Brasil e também não foram encontradas na literatura informações sobre as propriedades termofísicas de solo, este trabalho propõe-se a:

a) Estudar um sistema simplificado para mapear o comportamento térmico do solo ao longo do ano.
b) Obter os valores de difusividade térmica de um local determinado (IEE-USP) diretamente das medidas de campo, através do acompanhamento da temperatura do subsolo com termômetros digitais (sensor de temperatura LM335) e o uso das equações descritas por Ingerssol e Zobel em "Heat Conduction – with Engineering, Geological and Other Applications" **(ING-54**), equações 11 e 1.2.
c) Avaliar a possibilidade de reprodução em outros sítios.
d) Completar o levantamento das propriedades termofísicas com as medidas em laboratório para determinar a condutividade térmica e densidade do solo.
e) Verificar o grau de concordância com os valores obtidos nas medidas de campo.
f) Avaliar a influência da condutividade e difusividade térmica sobre um sistema de troca térmica enterrada no subsolo. Para verificar a potencialidade do sistema GSHP a baixa profundidade, as medidas de propriedades termofísicas do solo do IEE foram utilizadas como "estudo de caso".
g) Definir quais são os parâmetros importantes para determinação das potencialidades de sistemas GSHP

CAPÍTULO 2

O Solo e suas Propriedades Termofísicas

2.1) O Solo

Os fatores que determinam o comportamento térmico do solo podem ser agrupados em três categorias: variáveis meteorológicas, de subsolo e de superfície onde, por convenção, definiremos solo como constituído de superfície ar-solo e tudo o que está abaixo disto, chamado de subsolo.

-As diferenças regionais de larga escala na temperatura do subsolo são oriundas principalmente das variáveis meteorológicas, como radiação solar, temperatura do ar e precipitação, parâmetros que afetam as taxas de energia térmica transferidas de ou para o subsolo e a atmosfera.

-Variações locais de temperatura são causadas por diferenças de solo, características de superfície e propriedades termofísicas do subsolo.

A temperatura do solo varia continuamente, em resposta às mudanças no regime meteorológico que age na interface atmosfera-solo e às mudanças nos processos de troca de energia com o meio, influindo nas taxas e direções dos processos físicos, troca de massa com a atmosfera (por ex. evaporação); tipos e taxas de reações químicas e processos biológicos. Os efeitos destes fenômenos são propagados no solo através de uma série de processos de transporte complexos, que também são afetados pelas propriedades do meio (densidade volumétrica; umidade, etc).

Os quatro principais modos de transferência de energia no solo são:

Radiação

Convecção

Condução

Calor latente

O principal modo de transferência é por condução térmica. As transferências de calor por radiação, convecção e mudança de fase são de importância secundária.

2.1.1) Transferência de Calor por Condução

É a transferência de calor por difusão dentro do material. É descrita pela equação de transporte linear -ou primeira lei de condução de calor de Fourier-: O fluxo de calor em um meio homogêneo é proporcional ao gradiente de temperatura:

$$q_x = -k.A.\frac{dT}{dx} \qquad (2.1)$$

Em condições estacionárias (gradiente de T constante no tempo) a equação de condução de calor de Fourier é suficiente. Entretanto, em condições não-estacionárias ou transientes, é necessário recorrer ao princípio de conservação de energia na forma de uma equação de continuidade (**ING-54**):

$$c_p.\rho\frac{\partial T}{\partial t} = \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) \qquad (2.2)$$

onde:

c = calor específico

ρ = densidade volumétrica

$c_p.\rho$ = C = Capacidade térmica por unidade de volume

A combinação das equações de continuidade com a lei do Fourier resultam na segunda lei da condução de calor:

$$C\frac{dT}{dt} = \frac{d}{dx}\left(k\frac{dT}{dx}\right) \qquad (2.3)$$

fazendo k/C = α (difusividade térmica):

$$\frac{dT}{dt} = \frac{d}{dx}\left(\alpha\frac{dT}{dx}\right) \qquad (2.4)$$

Esta equação é fundamental para qualquer modelamento de temperatura no solo. Entretanto, para resolve-la é necessário conhecer os valores das três variáveis C; k e α, denominadas de **Propriedades Térmicas do Solo.**

2.2) Propriedades Térmicas do Solo

As três variáveis são: Capacidade térmica; Condutividade e Difusividade térmicas

2.2.1) Capacidade Térmica (volume constante) - (**C**)

Razão entre a quantidade de energia térmica fornecida ao corpo e o correspondente acréscimo de temperatura ($J.m^{-3}.K^{-1}$), que depende da composição e densidade (vide tabela 2.1):

meio	**Densidade**	**Calor específico**	**Capacidade térmica**
	($kg.m^{-3}$)	**($J.kg^{-1}.K^{-1}$)**	**($J.m^{-3}.K^{-1}$)**
Água	1000	4185	$4{,}18 \cdot 10^{6}$
Ar	1,21	1010	$1{,}21 \cdot 10^{3}$
Gelo	920	2120	$1{,}95 \cdot 10^{6}$
Solo	1000-2650	890	$1{,}16 \cdot 10^{6} – 2{,}00 \cdot 10^{6}$
Solo (orgânico)	50-300	1920	$7{,}50 \cdot 10^{4} – 2{,}00 \cdot 10^{5}$

Tabela 2.1 Valores de densidade, calor específico e capacidade térmica para algumas substâncias (**SFU-03)**

2.2.2) Condutividade Térmica do solo (**k**)

Quantidade de energia térmica transferida através de uma unidade de área, em uma unidade de tempo submetida a um gradiente de temperatura de um grau ($J.m^{-1}.K^{-1}.s^{-1}$), que depende do tipo e proporção das partículas constituintes do solo; umidade; do tamanho, forma e arranjo espacial (tabelas 2.2; 2.3; 2.4a e 2.4b).

meio		**Condutividade Térmica**
		($J.m^{-1}.C^{-1}.s^{-1}$)
Ar		0,02
Água		0,6
Gelo		2,1

Tabela 2.2: Condutividade térmica para ar e água (líquida e gelo)

2.2.3) Difusividade Térmica (**α**)

É a razão entre a condutividade térmica e a capacidade térmica e mede a relação entre a capacidade do meio (neste caso, o solo) em conduzir energia térmica e sua capacidade de acumulá-la.

$$\alpha = \frac{k}{C} \tag{2.5}$$

2.3) Classificação do Solo e das Rochas (FED-98)

O fator mais importante para o projeto e operação adequada de um sistema de troca térmica com o solo é a taxa de troca de calor entre o equipamento, solo e rochas que o envolvem. A condutividade térmica do solo e rochas é o fator que determina o projeto do sistema de trocas, seu tamanho e a área de troca térmica necessária, afetando diretamente no custo de equipamento e instalação. As propriedades termofísicas do solo podem ser caracterizadas pelo tipo de sua composição, sendo bastante comum encontrar tabelas destas propriedades a partir desta classificação.

Segundo a Electric Power Research Institute (EPRI), a classificação do solo inclui areia grossa, cascalho, lama fina, argila fina e terra preta (mistura de areia, lama e argila), cada uma com propriedades térmicas específicas. A classificação de rochas é dividida em nove grupos geológicos (também é utilizada nos EUA outra classificação dada pela ASHRAE). Na tabela 2.2 é mostrada uma classificação de solos e rochas (valores médios) que é normalmente utilizada pelas empresas prestadoras de serviços americanas (**CLO-98**). Estes valores são normalmente usados para calcular tanto as dimensões ideais -para que o sistema de troca térmica funcione de forma conveniente-, como para a análise econômica do sistema.

De uma forma geral, as propriedades termofísicas do solo podem ser agrupadas de acordo com a classificação do solo. A classificação mais conhecida foi desenvolvida por Arthur Casagrande para resolver problemas de pavimentação de aeroportos durante a II

Guerra Mundial, tendo sofrido aprimoramentos ao longo dos anos. Neste sistema de classificação, todos os solos são identificados pelo conjunto de 2 letras, a primeira indicando o tipo de solo e a segunda fornecendo informação complementar a respeito do mesmo.
As 5 letras a seguir indicam os tipos de solos:

G gravel (*gravel*)
S areia (*sand*)
C argila (*clay*)
M silte (*mo* - pó em sueco)
O solo orgânico (*organic*)

As informações complementares são dadas pelas 4 letras a seguir:
W bem gradado (*well graded*)
P pobremente gradado (*poorly graded*)
H alta compressibilidade (*high compressibility*)
L baixa compressibilidade

O solo do IEE-USP é classificado como Argila orgânica quaternária – comum nas várzeas dos rios Pinheiros e Tietê.

As características térmicas de alguns materiais encontrados no solo são mostradas na tabela 2.3. A tabela 2.4 apresenta valores típicos de propriedades térmicas para alguns tipos de solo.

Certamente as propriedades termofísicas do solo podem ser avaliadas a partir das características gerais, de acordo com as classificações apresentadas, mas como esta avaliação é muito grosseira e o solo geralmente apresenta grande variação em sua composição, ela é insuficiente para a utilização no dimensionamento dos sistemas de troca térmica com o solo. Por isto a necessidade de efetuar medidas que representem o mais próximo possível os valores destas propriedades na região que se pretende implantar sistemas de GSHP (Ground-Source Heat Pump) – vide definições no apêndice B, pagina 4.

2.4) Relação entre propriedades termofísicas e o dimensionamento de trocadores de calor no subsolo

Os sistemas de bombas de calor geotérmicas podem ser descritos pela equação que relaciona a condutividade térmica do solo e a taxa de energia térmica trocada em um trocador de calor no subsolo:

$$\dot{q} = \frac{2.\pi.k.L.(T - T_0)}{I(X)} \tag{2.6}$$

onde:

$\dot{q}$ =Taxa de energia trocada (W)

k_s = Condutividade térmica do solo (W/m.K)

L = Comprimento do tubo enterrado no subsolo (m)

T = temperatura de saída do liquido (K)

T_0=temperatura de entrada (K)

$$I(X) = \int_{\frac{r}{2.\sqrt{\alpha t_1}}}^{\infty} \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta \tag{2.7}$$

r = distância entre o eixo central do tubo trocador de calor e a posição onde se mede a temperatura.

α = difusividade térmica do solo

t = tempo desde o início de operação do sistema de troca

$$\beta = \frac{r}{2.\sqrt{\alpha(t - \tau)}} \tag{2.8}$$

τ = variável de tempo com limites 0 e t

Os resultados obtidos dos valores de condutividade e difusividade térmica, calor específico e densidade do solo são utilizados nas equações que dimensionam os sistemas de

troca térmica com o solo -cujas relações estão descritas pelas equações (2.6); (2.7) e (2.8)-. A variável termofísica mais comumente medida é a condutividade térmica (k) que, juntamente com as demais variáveis necessárias -ou seja, o comprimento do tubo; a temperatura do solo não perturbado; a temperatura do solo a uma distância "r" depois do sistema ser posto em operação e a integral I(X)-, podem ser substituídos na equação (2.6) para o dimensionamento do trocador de calor disposto no solo.

As medidas de temperatura do solo em qualquer profundidade desejada ficaram mais fáceis de serem obtidas com o desenvolvimento de sensores.de estado sólido baratos e de alta qualidade, que podem ser enterrados e descartados após o uso. Estas medidas podem fornecer como subproduto o valor da difusividade térmica naquela região e, com uma pequena substituição na equação (2.6) também pode ser utilizada para o dimensionamento do sistema de troca térmica.

A tabela 2.3 apresenta as variáveis termofísicas referentes a alguns componentes mais comuns encontrados no solo. As tabelas 2.4a e 2.4b apresentam valores típicos de propriedades termofísicas para alguns tipos de solo, além de rocha e concreto.

Material	Thermal Resistivity h · ft · F/Btu	(W/m · °C)	Thermal Conductivity Btu/h · ft · F	(W/m · °C)
Quartz	0.19	(0.11)	5.3	(9.2)
Granite	0.43 ~ 0.48	(0.25 ~ 0.28)	2.3~2.1	(4.0 ~ 3.6)
Limestone	0.77	(0.45)	1.3	(2.2)
Sandstone	1.0	(0.58)	1.0	(1.7)
Mica	2.9	(1.70)	0.34	(0.059)
Organic Materials				
Wet	6.9	(4.00)	.145	(0.25)
Dry	12	(7.00)	.083	(0.14)
Water	2.9	(1.65)	0.35	(0.60)
Air	71	(40.0)	0.014	(0.025)
Ice	0.78	(0.448)	1.29	(2.23)

Tabela 2.3 – propriedades termofísicas de alguns materiais encontrados no solo (**BOS-85**)

Material	Thermal Resistivity h · ft · F/Btu	(°C · m/W)	Thermal Conductivity Btu/h · ft ·F	(W/°C · m)
Loose dry sand	3.03	(1.75)	0.33	(0.57)
Moist clay	1.38 ~ 1.56	(0.8 ~ 0.9)	0.72 ~ 0.64	(1.25 ~ 1.11)
Sandy clay moist	1.38 ~ 1.56	(0.8 ~ 0.9)	0.72 ~ 0.64	(1.25 ~ 1.11)
Compacted sand	1.38 ~ 1.56	(0.9 ~ 0.9)	0.72 ~ 0.64	(1.25 ~ 1.11)
Cinder fill	1.38 ~ 1.56	(2.00)	0.29	(0.5)

Tabela 2.4a Valores típicos de propriedades termofísicas de alguns tipos de solo (**BOS-85**)

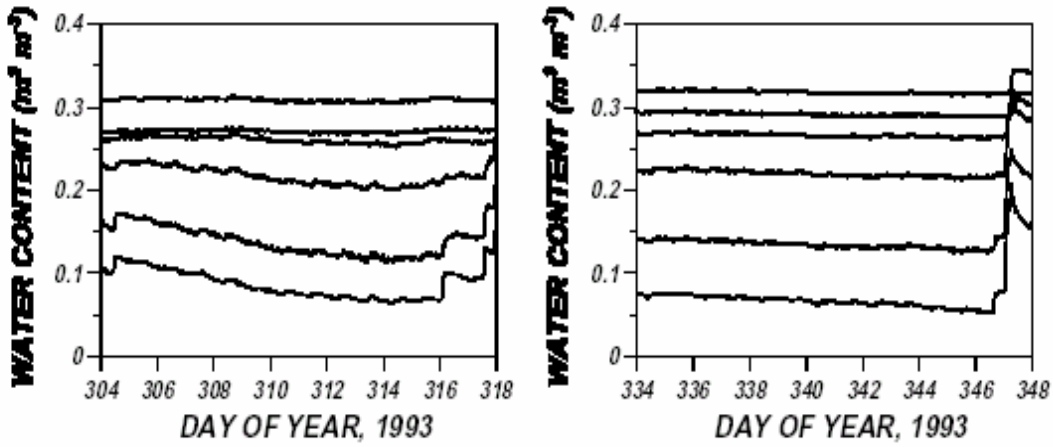
Material Descriptor	Thermal Conductivity k Btu/h·ft·F(W/m·°C)		Thermal Diffusivity α $ft^2/h(m^2/h)$		Density $lb/ft^3(kg/m^3)$		Specific Heat Btu/lb·F(kJ/kg·°C)	
Dense Rock	2.00	(3.46)	0.050	(0.00465)	200	(3200)	0.20	(0.84)
Average Rock	1.40	(2.42)	0.040	(0.00372)	175	(2800)	0.20	(0.84)
Dense Concrete	1.00	(1.73)	0.033	(0.00307)	150	(2410)	0.20	(0.84)
Solid Masonry					143	(2290)	0.21	(0.88)
Heavy Soil, Damp	0.75	(1.30)	0.025	(0.00232)	131	(2100)	0.23	(0.96)
Heavy Soil, Dry					125	(2000)	0.20	(0.84)
Light Soil, Damp	0.50	(0.865)	0.020	(0.00186)	100	(1600)	0.25	(1.05)
Light Soil, Dry	0.20	(0.346)	0.011	(0.00102)	90	(1440)	0.20	(0.84)

2.9

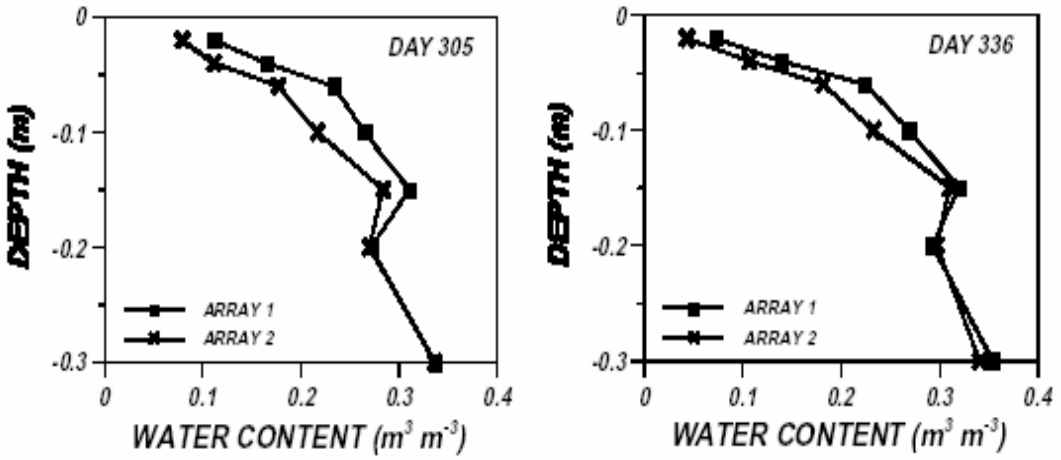
Tabela 2.4b. – continuação Valores típicos de propriedades termofísicas de alguns tipos de solo com e sem umidade e incluindo também rocha e concreto (**ASH-82**)

2.5) Comportamento das Propriedades Termofísicas com as Frações Volumétricas de Umidade, de Sólido e de Ar

O grande número de variáveis presentes na determinação das propriedades do solo, a dificuldade em acompanhá-las ao longo do tempo, a grande variabilidade de composição e o grau de umidade tornam os valores das propriedades termofísicas quase puntuais, no sentido de o valor encontrado de uma determinada propriedade ser válido apenas naquele ponto e em período de tempo restrito - apesar de encontrar-se na literatura generalizações acerca destas propriedades, numa tentativa de tomar valores médios de um dado local e o conjunto destes valores poderem ser ajustados a funções que descrevam as propriedades em meso ou macro regiões, como em Matsumoto et al. (**MAT-99)**. Uma demonstração desta variabilidade pode ser observada nos estudos publicados por S. R. Evett (**EVE-94**), mostrando que a composição de água no solo além de variar com o regime de chuvas -vide figuras 2.1 e 2.2- em que estão evidenciadas as precipitações nos dias 304, 316, 317 e 346-, ainda apresenta variação no perfil do solo -as linhas das figuras 2.1 representam, de cima para baixo, as profundidades 0,15m; 0,2m; 0,1m; 0,06m; 0,04m e 0,02m. Nas figuras 2.2 é mostrada a quantidade de água presente em dois arranjos distantes apenas 0,4 metros um do outro, nos dias 305 e 336. Pode-se notar que a composição de água no solo pode variar em distâncias tão pequenas como os 40 cm verificados neste estudo.



Figuras 2.1 – Conteúdo de água no arranjo TDR (Time Domain Reflectrometry) . As precipitações de chuva aparecem nos dias 304; 316; 317 e 346. De cima para baixo, as linhas representam as profundidades: 0,2m; 0,15m; 0,1m; 0,06m; 0,04m e 0,02m



Figuras 2.2 Perfil de conteúdo de água no período de interesse em dois arranjos distantes 0,4m um do outro.

A variação da umidade tem como conseqüência uma alteração da condutividade térmica, cujo comportamento obviamente depende também das outras variáveis citadas. No estudo de Abu-Hamdeh (**ABU-00**) em "*Effect of tillage treatments on soil thermal conductivity for some Jordanian clay loam and loam soils*" verificou-se que o comportamento da condutividade térmica do solo a 20 centímetros de profundidade para dois tipos de solo cultiváveis (*clay loam e loam*) e três tipos distintos de tratamento (arado de disco; arado de grade e sem tratamento), apresentaram variação de quase 200% na sua condutividade térmica -figuras.2.3a e 2.3b.

Estudos recentes mostram que, ao menos em solos com textura média, as propriedades térmicas estão "mais fortemente relacionadas" com a variação da fração volumétrica de ar nos poros do solo que a variação da fração volumétrica de água ou de sólidos (**OCH-01**), o que implica que no estudo das propriedades térmicas do solo também se deve levar em conta a fração de ar presente na amostra além de avaliar em que proporção ela influi nas propriedades termofísicas -figura 2.4. É obvio que, apesar da correlação ser muito "forte", é de ordens de grandeza menor que a influência da parte sólida e líquida.

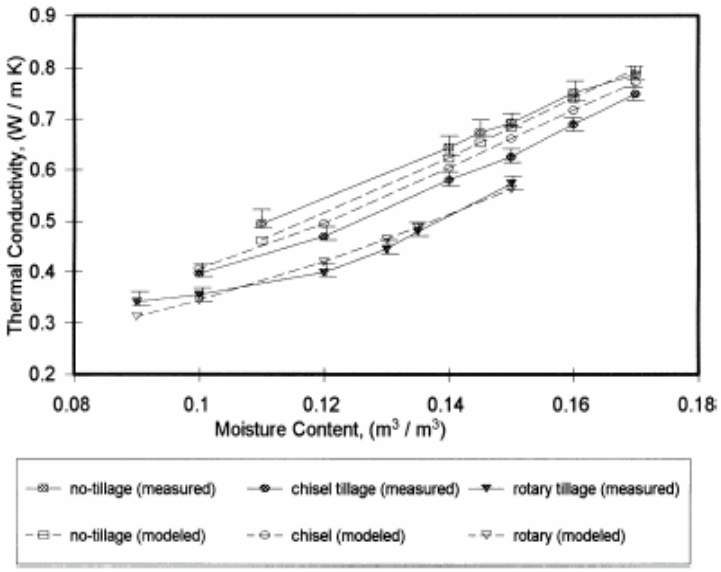


Figura 2.3a Efeito do tratamento de solo (loam) para cultivo sobre a condutividade térmica do solo em função da umidade, a uma profundidade de 20 cm.

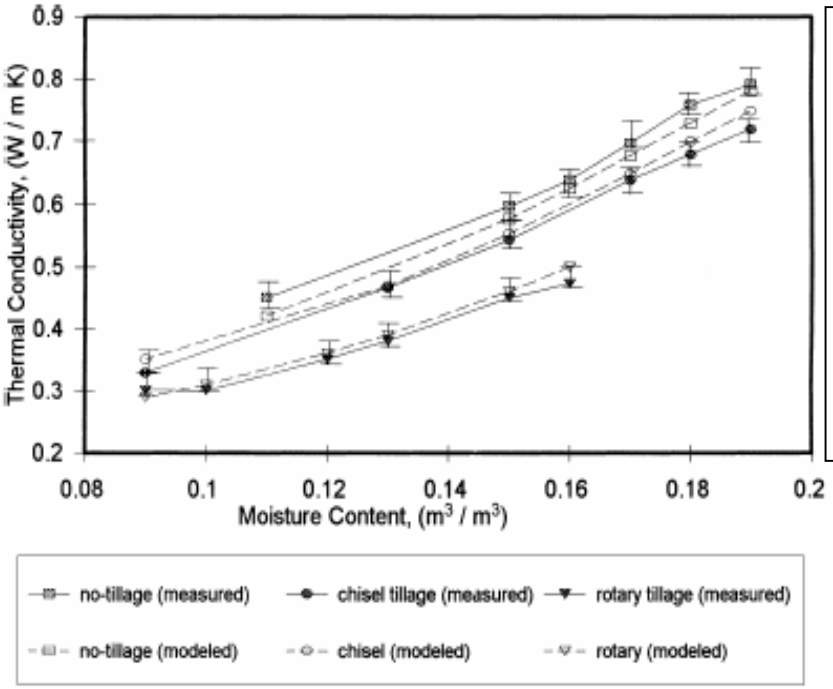


Figura 2.3b Efeito do tratamento de solo (clay loam) para cultivo sobre a condutividade térmica do solo em função da umidade, a uma profundidade de 20 cm.

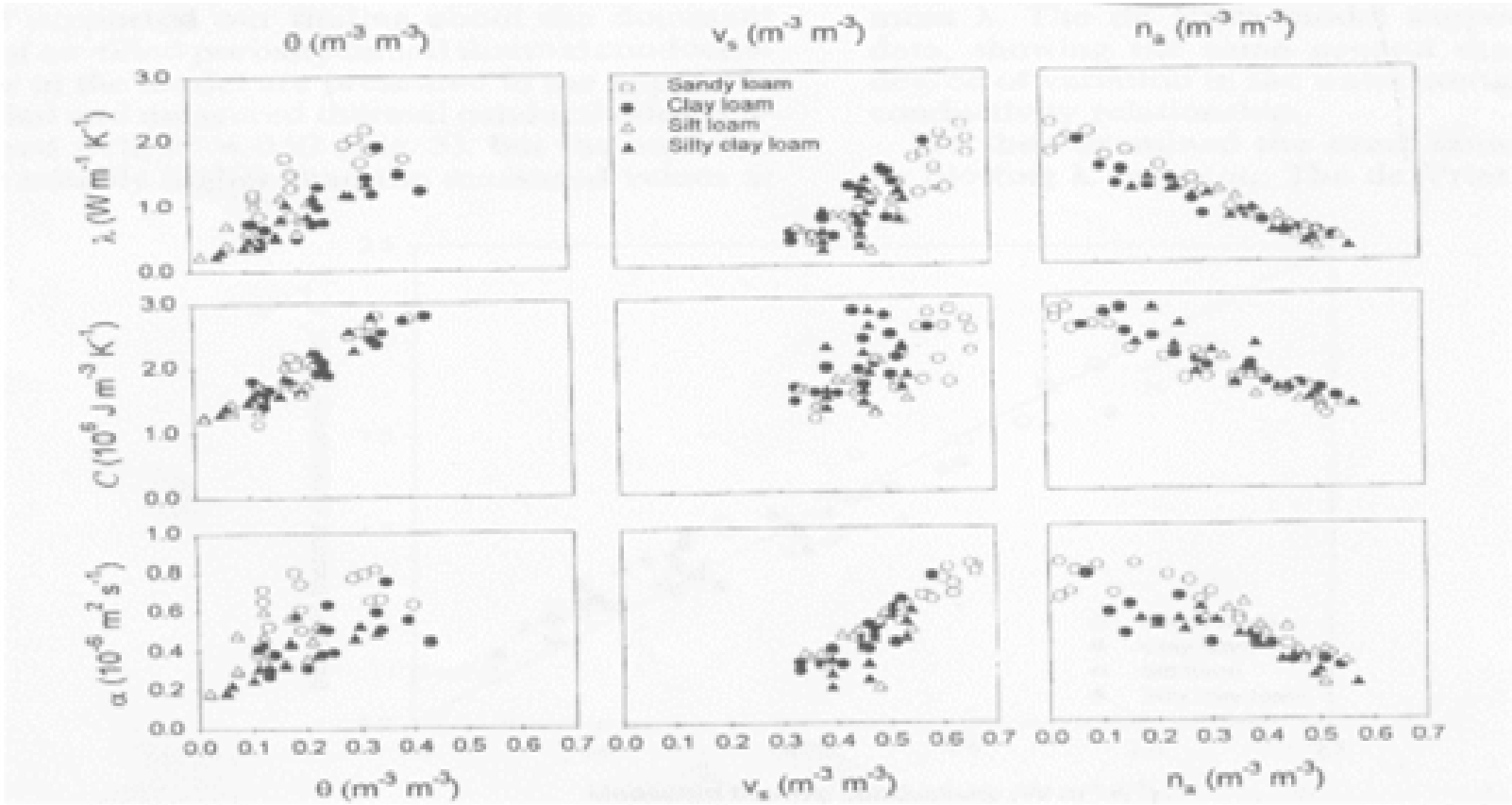


Fig. 2.4 Comportamento da condutividade Térmica (aqui chamada de λ), capacidade térmica (C) e difusividade térmica (α) em função da água (θ); sólidos (v_s) e ar (v_a) presentes no solo para 4 tipos de solo de textura média (**OCH-01**)

2.6) Influência dos valores obtidos das propriedades termofísicas nas Equações de Dimensionamento de GSHP

Como descrito no princípio de funcionamento de sistemas GSHP, **Apêndice B**, a transferência de energia térmica entre o prédio e o solo provoca um aumento (ou queda) da temperatura do solo causada pela transferência de energia térmica do (ou para) o tubo enterrado no solo. Esta alteração da temperatura no solo é estimada pela "Kelvin line source Theory" na forma da equação 90 do **apêndice C** "Dimensionamento de sistemas GSHP":

$$\Delta T = \frac{S'}{2\pi\alpha}\int_{r\eta}^{\infty}\frac{e^{-\beta^2}}{\beta}d\beta \equiv \frac{S'}{2\pi\alpha}I(r\eta) = \frac{Q'}{2\pi\kappa}\int_{\frac{r}{2\sqrt{\alpha t}}}\frac{e^{-\beta^2}}{\beta} = \frac{Q'}{2\pi\kappa}I(\frac{r}{2\sqrt{\alpha t}}) \qquad (2.9a)$$

que também pode ser reescrita na forma, já levando em conta o efeito da interface ar-solo e aplicando o método do espelho descrito no **apêndice C**:

$$\left(T - T_0\right) = \frac{\dot{q}.\left(I(X)_r - I(X)_{2D}\right)}{2.\pi.k.L} = \frac{\dot{q}.\left(I(X)_r - I(X)_{2D}\right)}{2.\pi.\alpha.C.L} \qquad (2.9b)$$

ou, por unidade de comprimento de tubo:

$$\left(T - T_0\right) = \frac{Q'.\left(I(X)_r - I(X)_{2D}\right)}{2.\pi.\alpha.C} \qquad (2.9c)$$

onde:

$$I\left(\frac{r}{2\sqrt{\alpha.t}}\right) = I(X)$$

k = α.C = condutividade térmica do solo em W/m.K

T = temperatura do solo a uma distância r do tubo K

T_0 = temperatura do solo não perturbado K

$\dot{q}$ = taxa de energia térmica depositada (ou retirada) do tubo em watts

Q'= taxa de energia térmica depositada (ou retirada) por metro de tubo em W

r = raio do tubo em m

D = profundidade em que está localizado o tubo (a partir da superfície) em m

α = difusividade térmica em m^2/h

C = capacidade térmica em J/K.m^3

L = Comprimento do tubo, em metros.

$$I(X) = I\left(\frac{r}{2.\sqrt{\alpha.t}}\right) = \int_{\frac{r}{2.\sqrt{\alpha.t}}}^{\infty} \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} \qquad (2.10)$$

$$\beta = \frac{r}{2.\sqrt{\alpha(t-\tau)}} \qquad (2.11)$$

t = tempo

e τ varia de 0 a t

Para valores de X maiores que 0,2, a integral I(X) reduz-se a -vide figura C.12 e subseqüentes, no **apêndice C-**:

$$I(X) = \ln\tfrac{1}{X} + \frac{X^2}{2} - \frac{X^4}{8} - 0{,}2886 \qquad (2.12)$$

Se o diâmetro do tubo é fixado em 1 ½ polegadas (r=1,89 10^{-2} metros) e α = 0,001 m^2/h, a condição $\frac{r}{2\sqrt{\alpha.t}} < 0{,}2$ é satisfeita se t > 2,32 horas (condição geralmente satisfeita).

A figura 2.5 apresenta a variação de I(X) em função de α desde valores 50% menores que o valor medido até 100% maiores.

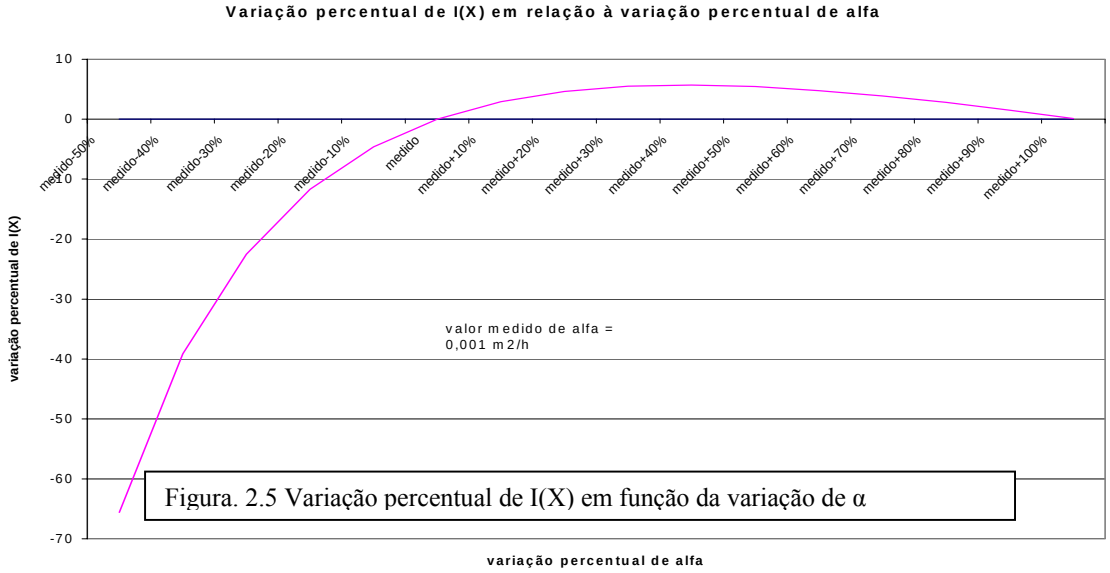


Figura. 2.5 Variação percentual de I(X) em função da variação de α

2.7) Métodos para obtenção da Difusividade

Os valores de difusividade do solo podem ser obtidos a partir de diferentes formas e métodos, como mostrado por Beck **(BEC-88)** e Horton et al. (**HOR-83**). Um destes métodos, considerado de boa acurácia e rapidez, chamado "Método da Agulha de Prova" (*Needle_Probe Method*), descrito por Larson (**LAR-88)** e Herzen (**HER-59),** utiliza uma ou mais agulhas de prova em cujo interior são colocados um fio resistor para aquecimento e um thermistor para registrar a temperatura durante o transiente de aquecimento da agulha de prova, imersa no meio em que se quer medir a condutividade térmica.

As propriedades térmicas do solo têm sido estudadas pelas mais diversas áreas e para as mais diversas finalidades e a variável mais comumente medida é a temperatura do solo. Posicionando os sensores a profundidades convenientes – em geral à profundidade de instalação do sistema GSHP, os valores de condutividade e difusividade térmica podem ser obtidos como subproduto do mapeamento do comportamento térmico do solo de uma dada região.

O método de "ondas de temperatura", proposto por Ingerssol (**ING-54**) faz uso da propagação das "ondas de calor" no subsolo provenientes das mudanças de estação do ano. O acompanhamento das senóides de temperatura do solo em diferentes profundidades, com suas características físicas distintas, apresentam uma defasagem e atenuação da onda de calor no ponto mais profundo em relação à temperatura do ponto com menor profundidade. Em particular, o ponto de menor profundidade pode ser externo ao solo, podendo-se então utilizar as medidas de temperatura do ar como referência para obtenção dos parâmetros envolvidos na defasagem e na atenuação da onda no ponto de interesse de medida no subsolo.

Os valores de amplitude máxima da temperatura ambiente e de temperatura do solo a uma determinada profundidade ao longo do ano são inseridas na equação C.118 do **apêndice C**:

$$T_R = 2T_0 e^{-x\sqrt{w/2\alpha}} = 2T_0 e^{-x\sqrt{\pi/\alpha P}} \qquad (2.13)$$

onde $\boldsymbol{w}$ foi substituído por $2\pi/P$

P = período (365 dias ou 8766 horas)

x = profundidade (metros)

T_0 = amplitude, ou metade da variação máxima de temperatura na superfície (^{0}C)

T_R = variação máxima observada na temperatura a uma profundidade x (^{0}C)

α = difusividade (m^2/h ou m^2/dia)

E o valor de difusividade naturalmente pode ser obtido.

A obtenção da defasagem da onda no solo pode ser feita por comparação entre as funções de temperatura do ar, dado pela eq.1.1 e do solo, dado pela eq. 1.2 e, novamente, a difusividade pode ser obtida.

A curva que representa a variação de ($T-T_0$) em função do valor de α é mostrado na figura 2.6. Observa-se que pequenas variações na avaliação da difusividade térmica do solo podem provocar grandes alterações na função ($T-T_0$).

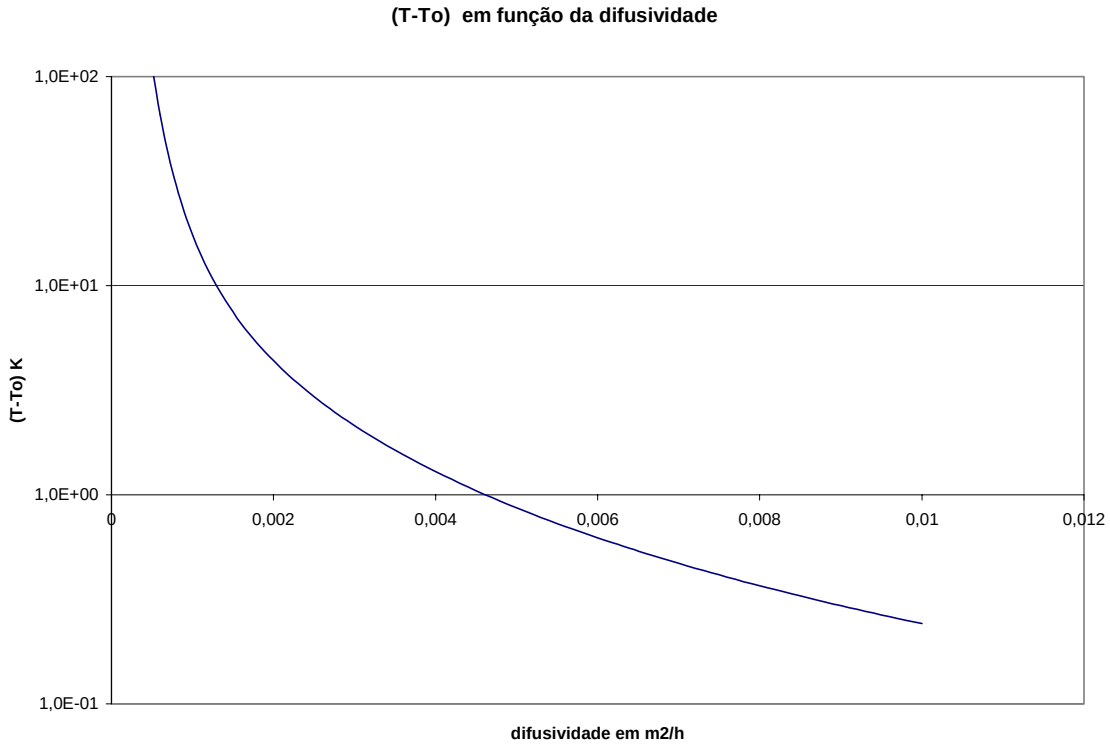


Figura 2.6 Comportamento de ($T-T_0$) em função da difusividade

A conveniência da avaliação da difusividade térmica pelo método proposto fica evidente, pois a medida da propriedade termofísica na profundidade de instalação do sistema GSHP fornece automaticamente o valor médio naquela região, evitando desta forma erros grosseiros no dimensionamento do sistema.

O comportamento térmico do solo no Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE-USP) foi levantado a partir de um sistema de aquisição de dados montado no próprio Instituto (descrito a seguir). Foram coletadas informações de temperatura do solo a 2 metros de profundidade (T_{solo}) sob uma das salas de alunos do PIPGE ao longo de um ano. Os dados de temperatura ambiente na cidade de São Paulo ($T_{ambiente}$) foram fornecidos pela Estação Meteorológica do Instituto Astronômico e Geofísico (IAG-USP), localizado no bairro da Água Funda, no período de 1997 a 2000 (**CAM-01**).

As medidas pelo "*Needle Probe Method*" foram realizadas entre 1997 e 1998, nas dependências do IEE-USP próximas às salas de alunos do PIPGE. As medidas de condutividade térmica e densidade do solo foram realizadas no IAG-USP campus Butantã, a partir de amostras obtidas no IEE-USP. O resultado obtido para a difusividade térmica pelo "*Needle Probe Method*" foi então comparado com o obtido pelo "Método de Onda de Calor".

CAPÍTULO 3 Sistema Aquisição e Equipamentos Experimentais para Coleta de Dados

O levantamento experimental do comportamento térmico do solo exigiu a montagem de um sistema de aquisição de dados de temperatura, coleta de informações por aproximadamente um ano; uso dos dados de temperatura ambiente fornecidos por uma estação meteorológica, além de medidas complementares realizadas em laboratório de geofísica. As medidas de temperatura do solo foram obtidas através de um sistema de aquisição de dados montado e calibrado no IEE-USP. Os dados de temperatura ambiente foram cedidos pelo Departamento de Meteorologia do IAG-USP. Foram realizadas em laboratórios de Geofísica do Departamento de Geofísica do IAG-USP as medidas de condutividade térmica, calor específico e densidade da amostra de solo colhidas no IEE-USP.

3.1) Sistema de Aquisição de Dados de Temperatura e Locação dos Termômetros

O sistema de aquisição de dados de temperatura foi montado a partir de uma placa de aquisição de oito canais, três dos quais destinados a acompanhamento das temperaturas no solo (uma posição e três profundidades diferentes), um canal para acompanhar o ar externo e mais quatro pontos destinados a medidas de temperatura do ar dentro das salas do prédio ocupado pelos alunos do PIPGE. Os oito medidores de temperatura foram construídos a partir do circuito integrado LM335 e conectados ao ADC de oito canais ligado a um microcomputador PC286. Parte do equipamento é mostrado na figura 3.1.

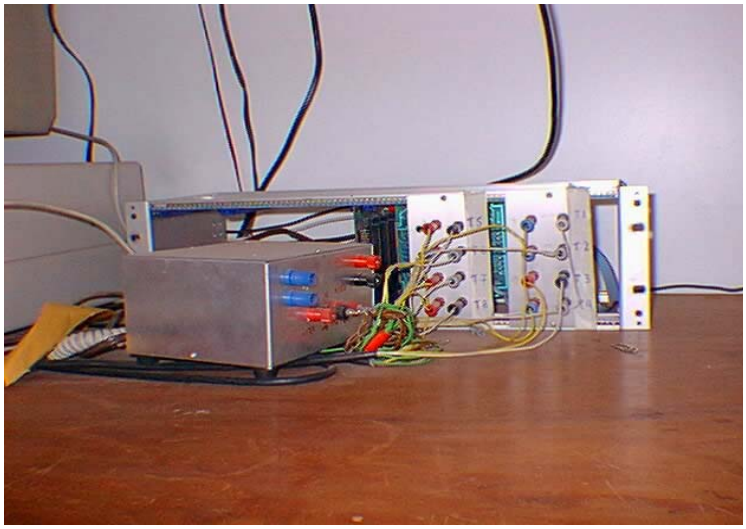


Figura 3.1
fonte de tensão e placa de aquisição de 8 canais

3.1.1) Calibração dos Termômetros

As calibrações foram realizadas com um misturador/aquecedor de água cedido por empréstimo pelo laboratório didático IFUSP onde são simultaneamente mergulhados os oito sensores de temperatura. Este equipamento de "banho maria" possui uma resistência elétrica e um misturador de água, o que permite a elevação da temperatura da água gradativa e homogeneamente, de forma a obter estabilidade de temperatura no novo valor escolhido.

Quando submetido a uma ddp, o circuito LM335 tem como característica uma queda de tensão proporcional à temperatura do ambiente a que está submetido. Comparando-se os valores de tensão com valores de temperatura, pode-se fazer uma calibração deste circuito e fazê-lo funcionar como um termômetro digital. Foi utilizado para este fim um termômetro de mercúrio com décimo de grau de precisão, também cedido por empréstimo pelo mesmo laboratório didático. Partindo de uma mistura água-gêlo próximo a 0^0 C, foram feitas as medidas de tensão do sistema (figura3.2) até temperaturas de aproximadamente 80^0C.

Figura 3.2
equipamento utilizado para calibração dos termômetros

Concluída a varredura neste intervalo de temperaturas, foram construídas as retas de calibração, com seus coeficientes de reta e coeficientes de correlação mostrados nas figuras 3.3 a 3.10. Os resultados das retas de calibração de cada sensor de temperatura foram introduzidos no sistema de aquisição de dados por meio de *software* construído em Qbasic. Assim, o sistema eletrônico está pronto para funcionar como medidor de temperatura de oito canais independentes. Para verificar a qualidade das medidas de cada termômetro eletrônico e quão bem eles representam um dado valor de temperatura, foram feitas no mesmo equipamento de "banho maria", medidas simultâneas de temperatura destes termômetros comparadas com o termômetro de mercúrio (tabela 3.1). A curva de dispersão é mostrada na figura 3.11, apresentando bom acordo entre os termômetros eletrônicos e o de mercúrio em todas as faixas de temperatura que nos interessam.

3.1.2) Instalação dos termômetros

Os termômetros colocados no solo foram dispostos num perfil vertical sob a sala 8 do prédio dos alunos do PIPGE, enquanto a maioria dos outros foram dispostos na parte interna desta sala, com o seguinte arranjo (vide figura 3.12):

1 termômetro enterrado no solo a 2 metros de profundidade, que é a profundidade padrão encontrada na literatura para instalação de sistemas GSHP horizontais

1 termômetro a 1 metro de profundidade, onde já se deve esperar influência significativa da temperatura externa.;

1 termômetro a 0,03 metros de profundidade, que já é a $T_{superfície}$, e deve acompanhar simultaneamente a evolução da temperatura externa;

1 termômetro sob o piso da casa; para acompanhar a temperatura do ar no colchão de ar formado sob a construção

1 termômetro que participou de 2 conjuntos de medidas: primeiro sobre o piso da casa e mais tarde remanejando para a iluminação zenital da sala vizinha – sala 7.

1 termômetro a 1,4 metros de altura do piso, dentro da sala, que acompanha a temperatura na altura da cabeça do usuário da sala

1 na clarabóia de iluminação zenital dentro da sala

1 termômetro externo sem proteção alguma, sob a copa da árvore em frente da sala (figura 3.12).

Figura 3.3 Reta de calibração, termômetro 1

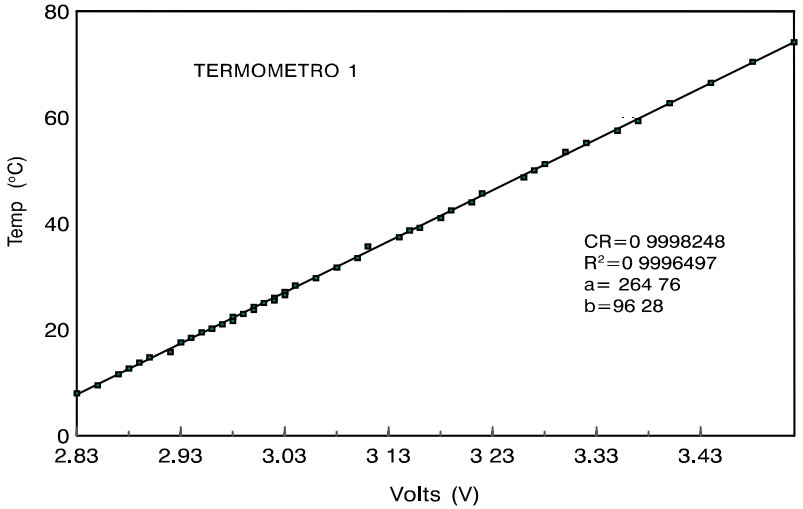


Figura 3.4 Reta de calibração, termômetro 2

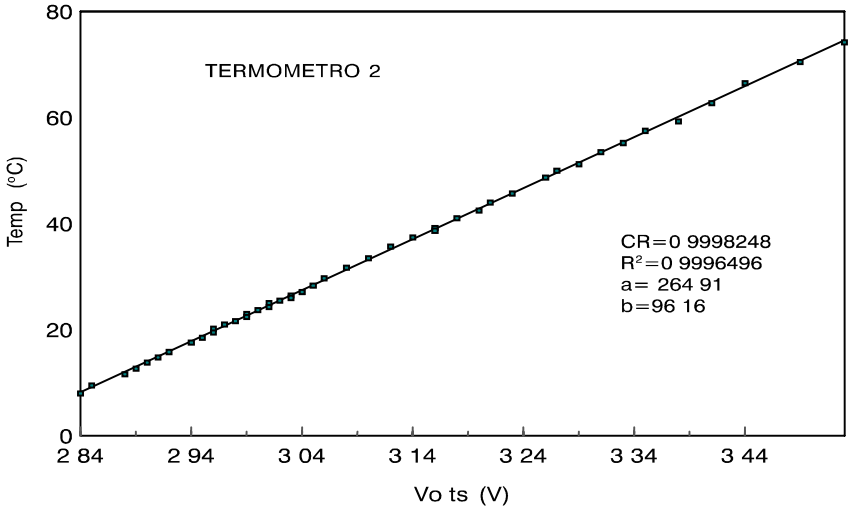


Figura 3.5 Reta de Calibração, termômetro 3

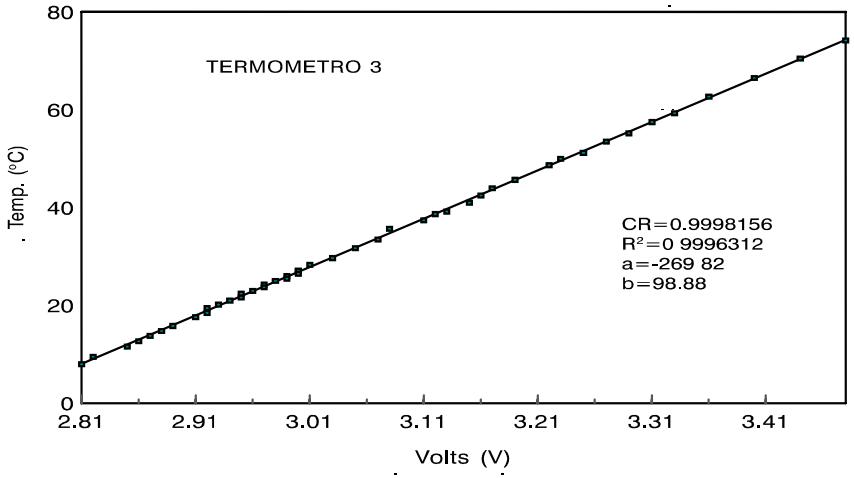


Figura 3.6 Reta de Calibração, termômetro 4

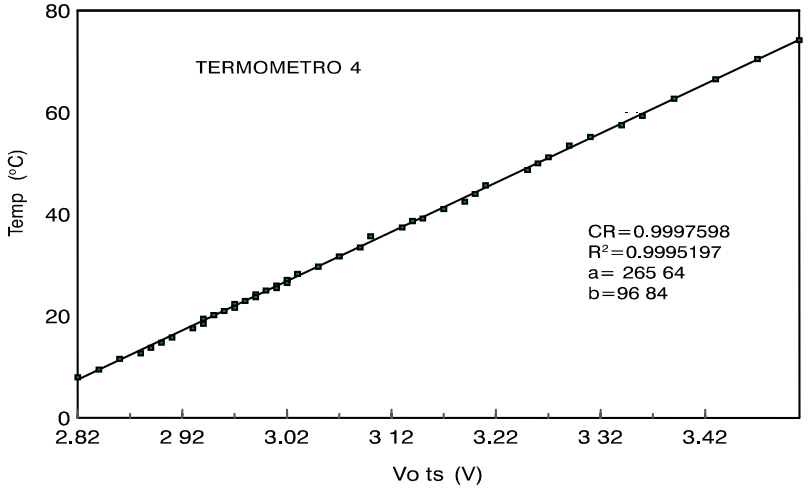


Figura 3.7 Reta de Calibração, termômetro 5

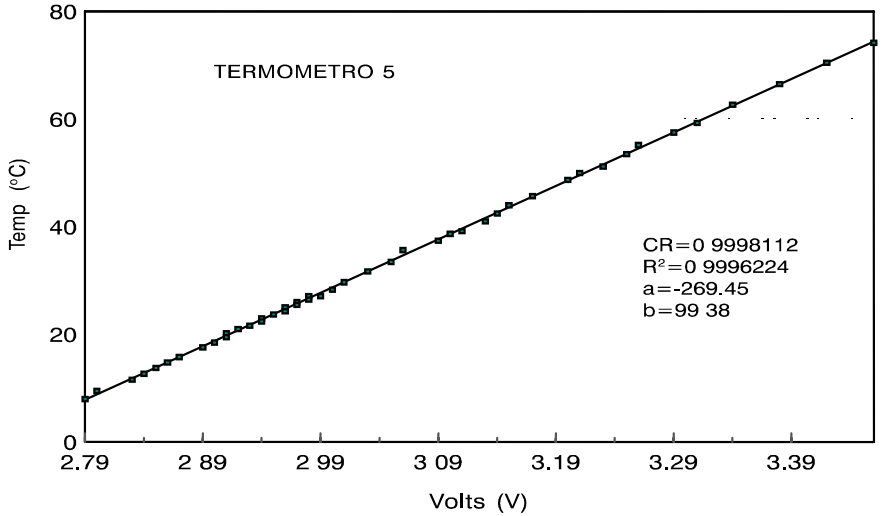


Figura 3.8 Reta de Calibração, termômetro 6

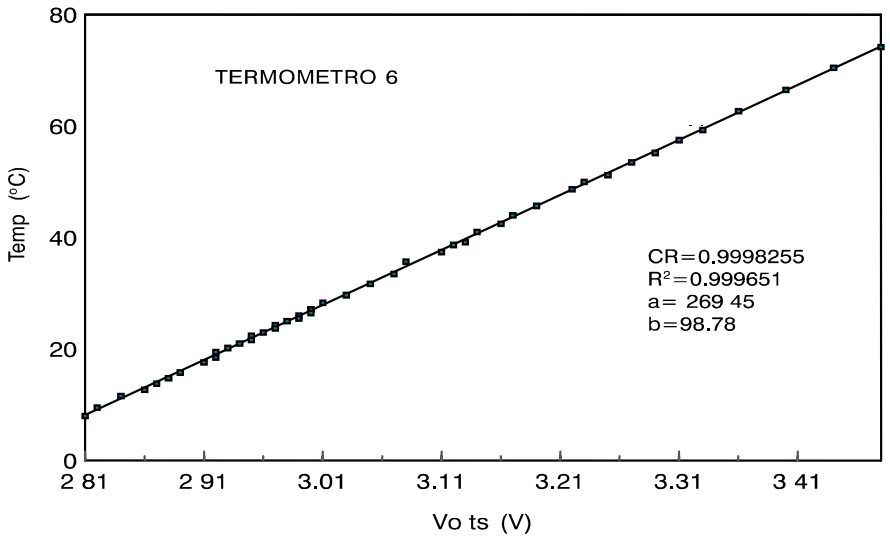


Figura 3.9 Reta de Calibração, termômetro 7

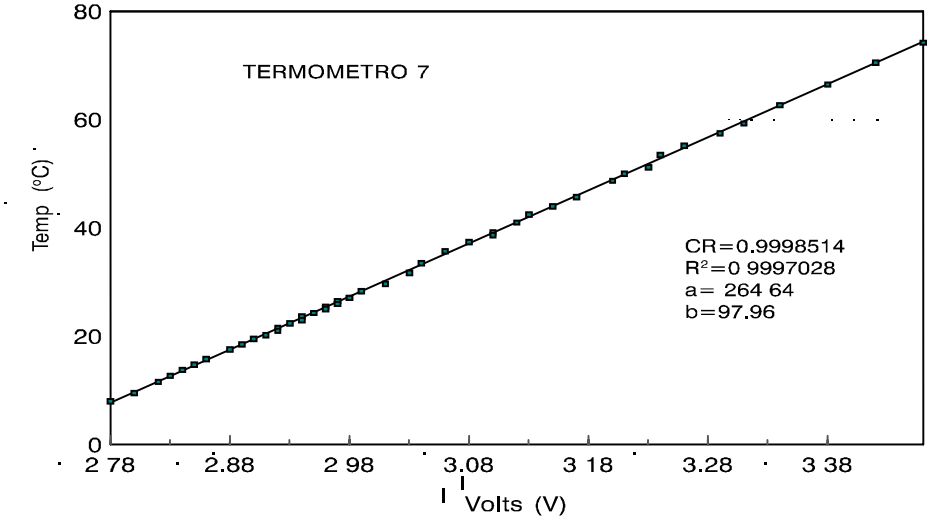
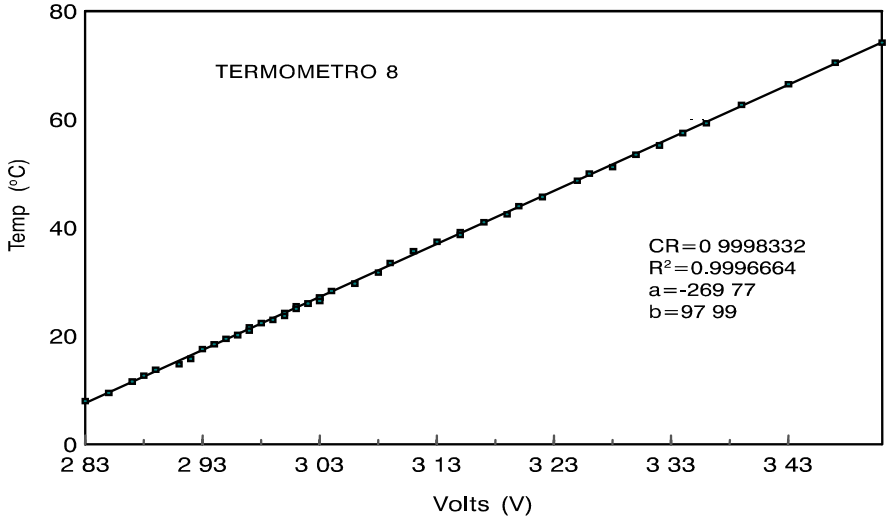


Figura 3.10 Reta de Calibração, termômetro 8



term, Hg	term,1	term,2	term, 3	term, 4	term, 5	term, 6	term, 7	term, 8
5,7	5,9	5,97	6,21	6,21	6,98	6,22	7,09	6
8,9	8,69	8,42	8,64	8,59	9,27	9,1	9,53	8,83
10	9,97	9,6	9,94	10,04	9,82	10,03	10,39	10,25
11,2	11,22	11,1	10,51	11,26	11,21	11,33	11,89	11,49
12,5	12,42	12,26	12,44	12,5	12,87	11,57	12,42	12,82
13,5	13,59	13,88	13,48	13,35	13,58	13,52	13,95	13,73
14,6	14,69	14,91	14,91	14,59	14,36	14,42	15,23	14,77
15,8	15,76	16,17	15,18	15,99	15,7	15,66	15,81	15,97
16,9	16,84	17,21	16,56	17,62	16,61	16,81	16,85	17,06
17,8	17,8	17,71	17,63	18,29	18	17,96	18,2	18,09
19,6	19,53	19,74	19,79	19,6	19,15	19,64	19,78	19,8
21,5	21,42	21,56	21,97	22	21,73	21,16	21,54	21,68
22,3	22,24	21,89	22,84	22,71	22,54	23,35	22,53	22,33
26,5	26,25	26,37	27,51	26,84	27,41	28,58	27,28	26,62
27	26,91	26,85	27,9	27,48	27,88	27,52	28,13	27,32
31,8	31,72	31,86	32,53	32,54	33,12	33,25	32,29	31,82
34,5	34,39	34,59	35,05	34,84	35	35,05	34,98	34,77
80,7	79,57	79,4	78,73	79,62	78,64	78,77	78,76	79,74
77,8	76,73	76,63	75,93	76,32	75,79	76,08	76,3	76,71
75,3	74,25	73,67	73,48	73,63	73,79	74,31	74,13	74,17
63,7	63,48	63,37	63,51	63,53	63,63	64,2	63,5	62,81
57,6	57,18	57,39	58,65	57,71	58,17	57,12	57,13	57,08
52	51,81	51,64	51,7	51,85	51,52	51,2	51,31	51,79
46,3	46,24	45,91	45,96	45,75	46,2	45,4	45,65	46,09
42,5	42,46	42,87	42,29	42,76	42,72	42,49	43,41	42,55
39	39,12	39,14	39,2	39,58	39,99	39,92	38,94	39,19
36	36,12	36,2	36,36	36,43	36,06	36,69	36,74	36,17
32,6	32,61	32,2	32,76	32,08	33,42	32,39	33,76	32,52
30,2	30,16	29,98	31,08	30,05	31,08	31,01	31,65	30,11

tabela 3.1 dispersão dos termômetros digitais em relação ao termômetro de Hg

\

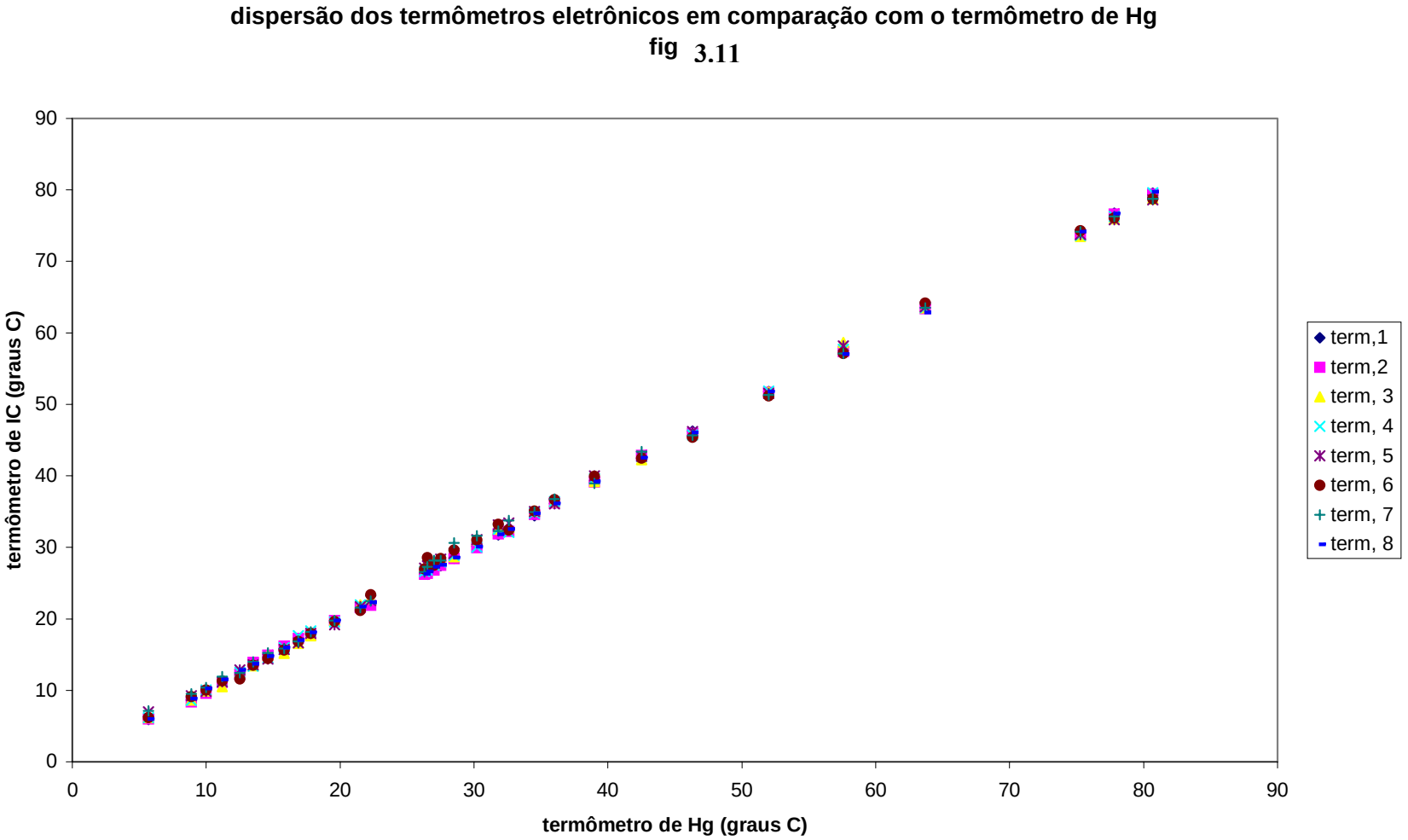


Figura 3.11 Dispersão dos oito termômetros eletrônicos no intervalo entre zero e 100 graus Celsius

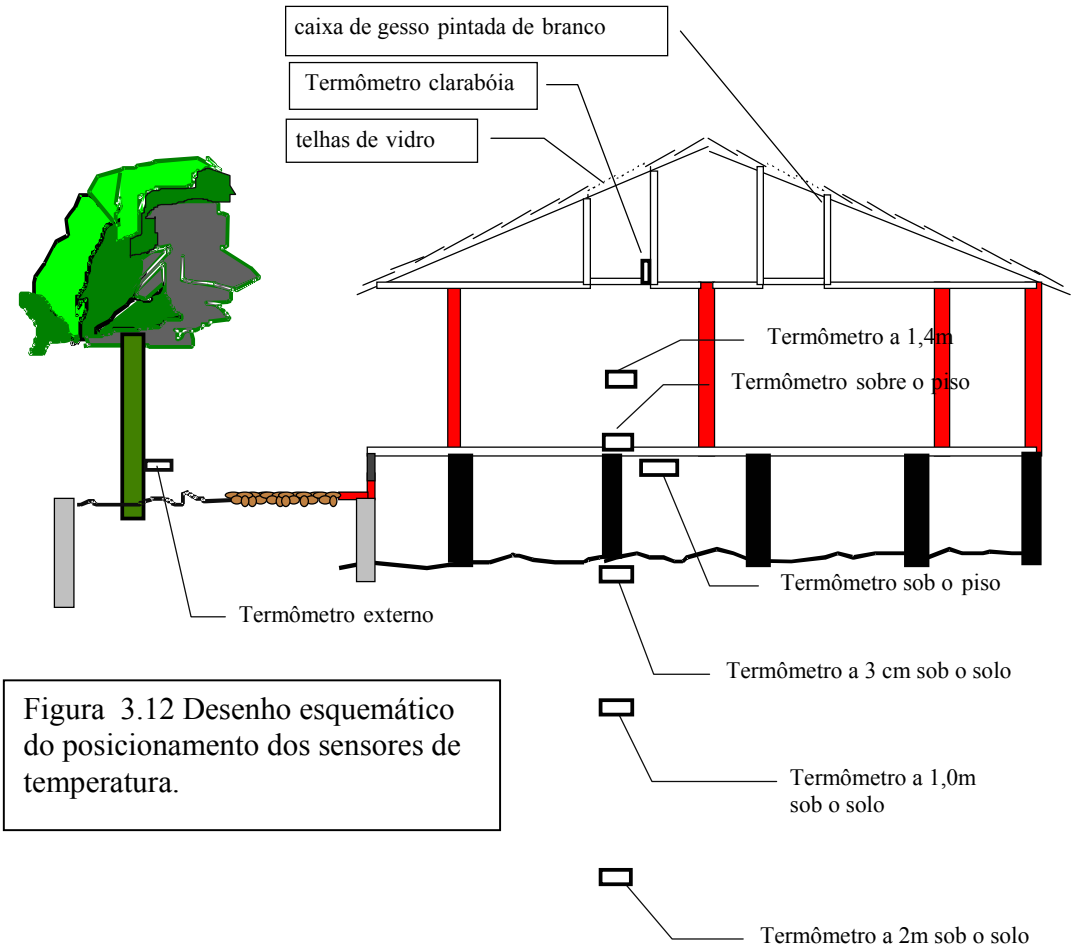


Figura 3.12 Desenho esquemático do posicionamento dos sensores de temperatura.

3.1.3) Resultado das Medidas de Temperatura

O programa executado em Qbasic realiza, a cada 15 minutos, uma varredura em todos os termômetros, coletando um conjunto de 500 medidas (na freqüência do micro) de cada um, calcula as respectivas médias, evitando assim os problemas de flutuação inerentes ao equipamento eletrônico, arquiva e plota o resultado em tela. Estes resultados são gravados em disquete para posterior análise em programas adequados, disponíveis em microcomputadores mais potentes. Para salvar os dados em disquetes é necessário interromper a coleta de dados, entrar com os comandos de salvamento e depois reinicializar a aquisição. Para evitar muitas interrupções no sistema, adotou-se a rotina de efetuar salvamento de dados uma vez por semana. Como na época o sistema não estava equipado com sistema *no-break*, as freqüentes quedas de energia elétrica provocaram perda de alguns

conjuntos de dados, interrompendo seqüências contínuas. Entretanto, como se observa nos resultados, isto não prejudicou a linha de tendência do comportamento térmico do solo.

Como já mencionado, a falta de estabelecimento de um padrão de medição semelhante aos laboratórios de meteorologia fez com que o termômetro externo, instalado sob a copa da árvore, apresentasse alto grau de flutuação, o que tornou indecifrável o caráter periódico das medidas obtidas. Por isto, na avaliação da difusividade do solo pela comparação das "ondas" térmicas do ambiente externo e do subsolo, as medidas de temperatura ambiente foram substituídas pela serie histórica de temperatura da cidade de São Paulo cedida pelo IAG-USP. Em primeira análise, a comparação de temperatura do solo colhida no Butantã com a temperatura externa colhida na Água Funda, onde está localizada a Estação Meteorológica, pode parecer inadequada, mas como o que nos interessa é a "forma" do comportamento térmico, as eventuais diferenças instantâneas de temperatura dos dois sítios distintos se dilui no processo metodológico de comparação entre eles.

As temperaturas resultantes dos termômetros instalados dentro da sala foram utilizadas para outras finalidades, como por exemplo, avaliar a inércia e cargas térmicas dentro do prédio. O acompanhamento de dois dias de medidas dos oito sensores instalados no IEE pode ser observado na figura 3.13

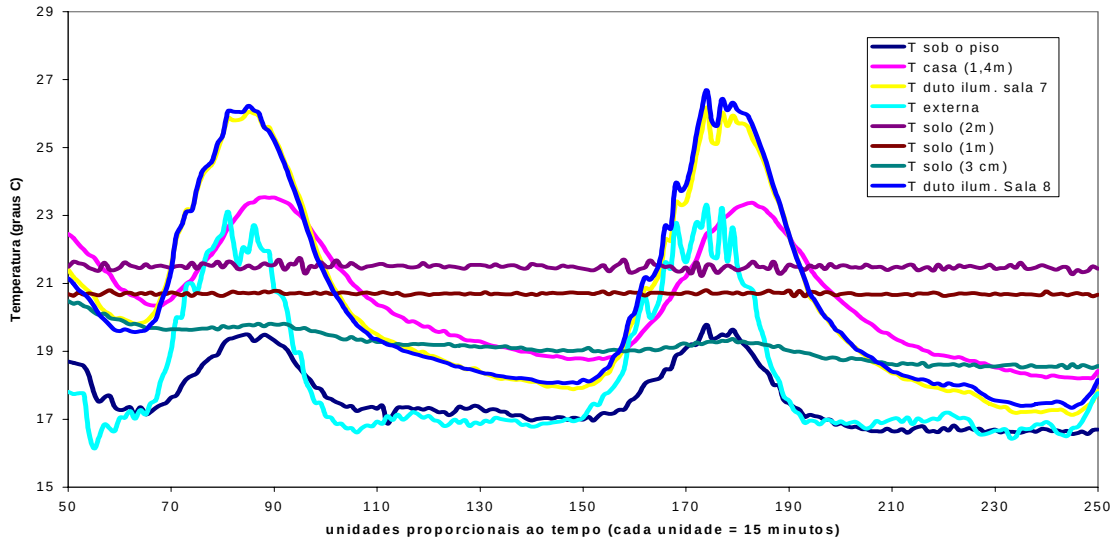


Figura 3.13 Perfil de T x tempo (uma medida a cada 15 minutos) durante 2 dias

Do gráfico 3.13, observa-se que:

1) Como esperado, a temperatura do solo mostrou-se constante ao longo dos dois dias de observação (sensores dispostos a 2m e 1m de profundidade).

2) Na interface solo/ar, a temperatura começa a oscilar juntamente com as variações de temperatura ambiente, com pequena atenuação na amplitude (sensor disposto a 3 cm sob o solo).

3) Na caixa de ar no espaço entre a casa e o solo, o comportamento da temperatura já está mais próximo da temperatura externa, com uma diferença, para baixo, da ordem de 10 graus centígrados.

4) Os sensores dispostos no chão, a 1,4 metros dentro da sala e no duto de iluminação zenital mostram o perfil de temperatura dentro da sala, além de mostrar os resultados do sensor deslocado para o duto de iluminação zenital da sala 7. A pequena diferença de temperatura observada entre os dutos de iluminação nas salas 7 e 8 foram atribuídas à contribuição térmica oriunda do maior número de pessoas que freqüentam a sala 8 em comparação com a sala 7.

5) O sensor de temperatura externo mostra as variações de temperatura dependentes do vento, chuva e cobertura de nuvens. As curvas de temperatura externa, do duto de iluminação e do sensor sob o piso exibem claramente as oscilações provocadas pelo vento e pelas nuvens. Dentro da sala este efeito praticamente desaparece devido à proteção das paredes. No solo, a inércia anula completamente qualquer efeito de curto período das componentes climáticas.

3.2) Curvas de Temperatura do Ar fornecidas pelo IAG

A figura 3.14 mostra os dados de temperatura externa coletados sob a copa da árvore próxima à sala 8 do prédio dos alunos e a comparação com os valores esperados de uma senóide teórica construída com os parâmetros característicos das condições ambientais do IEE. Pela figura fica evidente a impossibilidade de usá-los como comparação com os dados obtidos no solo.

fig. 2.16 Curva de temperatura ambiente ajustada (linha contínua) e dados obtidos de temperatura do ar externo (triangulos) no IEE (03/97 A 02/98)

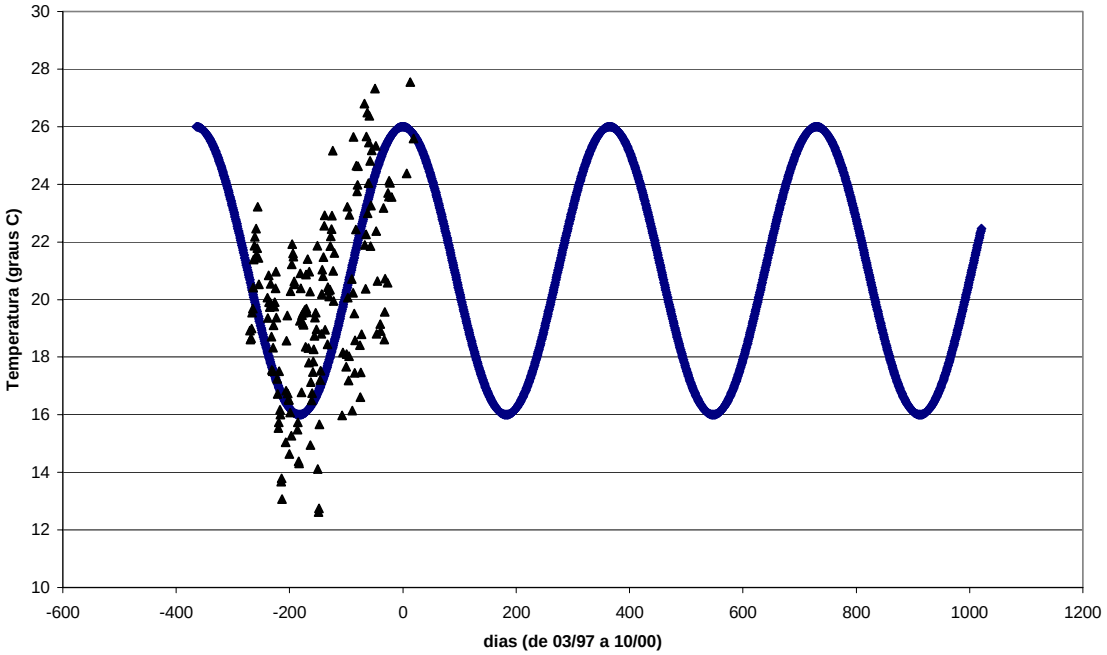


Figura 3.14 Pontos experimentais de temperatura ambiente obtidos pelo sensor instalado sob a copa da árvore próxima à sala 8 do prédio dos alunos do PIPGE comparado com a curva teórica esperada $\left(T = A + B\,\mathrm{sen}\left(\frac{\pi}{2} + \frac{2.\pi.t}{P}\right)\right)$, onde A = 21^0C; B = 5^0C; P = período de um ano ou 365 dias e t= tempo

Os dados de temperatura do ar fornecidos pelo IAG foram inseridos em um programa gráfico cujo resultado é apresentado na figura 3.15. Observa-se que as oscilações de alta freqüência (períodos de alguns dias) resultante de alterações bruscas de temperatura ainda não permitem uma avaliação detalhada dos parâmetros que interessam (amplitude, fase e período). Por isto, o arquivo ainda passou por um tratamento matemático para "suavizar" as oscilações de curto período e evidenciar as características de período anual do comportamento climático.

Este tratamento, o resultado obtido e a comparação com a curva de temperatura do solo serão apresentados no próximo capítulo.

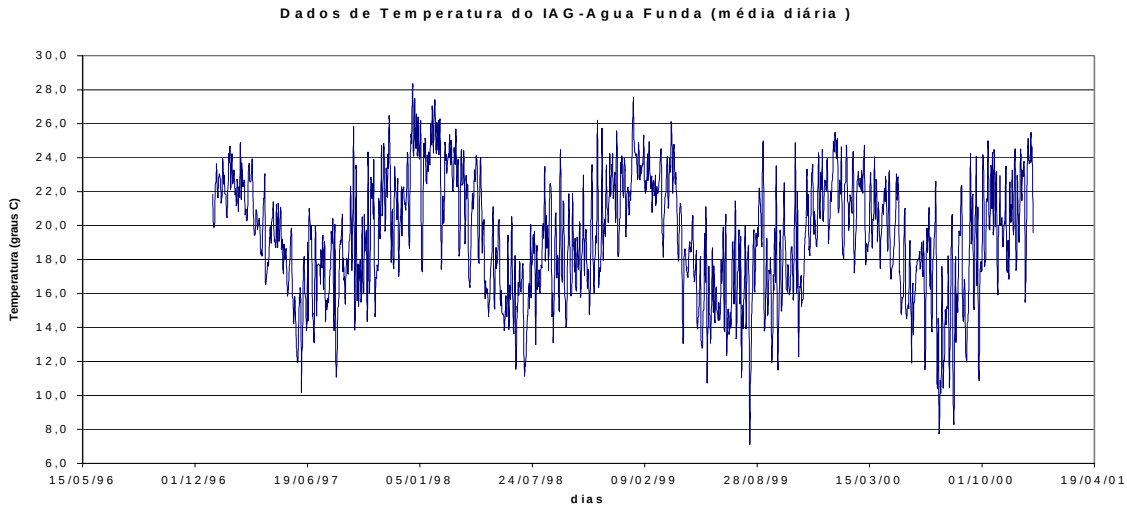


Figura 3.15 Temperatura média diária do ambiente medido no IAG-USP Água Funda entre 1997 e 2000

3.3) Cálculo de Condutividade e Difusividade pelo método da Agulha de Prova

A condutividade e a difusividade térmica do solo foram medidas por outro método, em que há medida direta no solo e através de amostra retirada de solo e submetida a procedimentos de laboratório. Esta comparação serve para verificar a acurácia e reprodutibilidade de avaliação da difusividade térmica pelo método de "Ondas de Temperatura", além de confirmar a suposição de que a comparação entre os dados de temperatura de solo e ar ambiente nestes dois sítios não provocou alteração no resultado.

O método de determinação por transiente da Condutividade e/ou Difusividade mais difundido é o de fonte de calor cilíndrica. Em particular, o método de "agulha de prova" considera que o fluxo de calor proveniente do eixo em que se encontra a agulha se espalha no plano ortogonal de forma radial, aproximando a fonte de calor como linear e infinitamente longa em um meio infinito em comparação com o tempo de medição - descrito por Herzen e Maxwell (**HER-59**). Para agulhas típicas (r ≈0,5 a 1,5mm), o tempo de medida é relativamente curto (2 a 3 minutos), desde que a granulação da amostra seja pequena o suficiente para não prejudicar o contato térmico agulha-amostra. A sonda é composta por uma única agulha hipodérmica que envolve um enrolamento simples de fio aquecedor e um sensor de temperatura tipo termistor, posicionado no

centro da agulha (figura 3.16). A eletrônica associada à sonda é mostrada nas figuras 3.17 e 3.18.

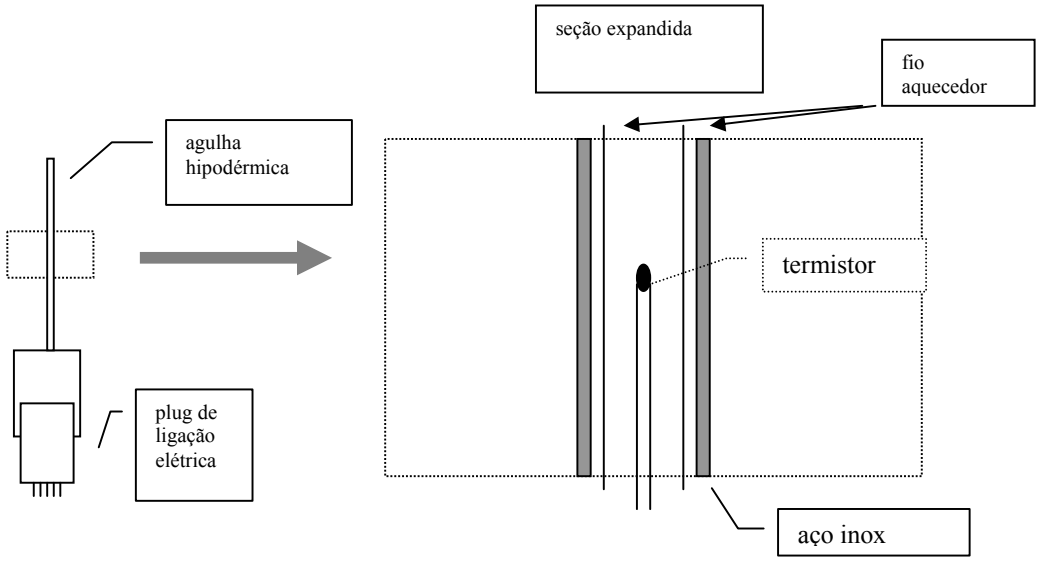


Figura .3.16 Arranjo da agulha de prova

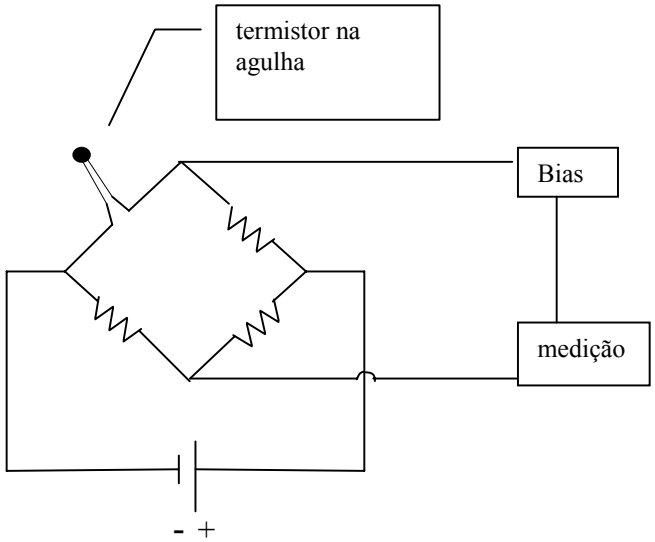


Figura 3.17 – Arranjo eletrônico associado ao termistor

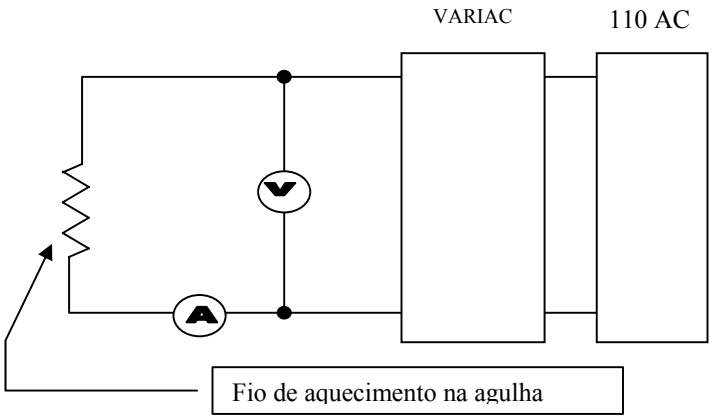


Figura 3.18 Esquema de aquecimento da agulha de prova

A teoria para determinação das propriedades térmicas do meio a partir da agulha de prova é desenvolvida em detalhes por Jaeger (**JAE-58**). A função que dá o comportamento de temperatura com o tempo, mostrada em Herzen e Maxwell é:

$$T = \frac{q}{4K\pi}\left(\ln\frac{4\alpha t}{Ba^2}\right) \qquad (3.1)$$

onde:

t = tempo

q = energia térmica liberada por unidade de comprimento e por unidade de tempo

k = condutividade térmica da amostra

$\alpha = {}^{k}\!/_{\rho.c_p}$ = difusividade térmica da amostra (3.2)

ρ = densidade do solo

c = calor específico do solo

a= raio da agulha

B = constante = 1,7811

Esta relação é válida quando t é suficientemente grande comparado a a^2/α e tempos não muito grandes (abaixo da dezena de minutos), devido à aproximação de meio infinito e fonte linear infinita de calor.

A agulha de prova é introduzida no solo, no local em que se pretende medir sua condutividade.

3.3.1) Arranjo Experimental

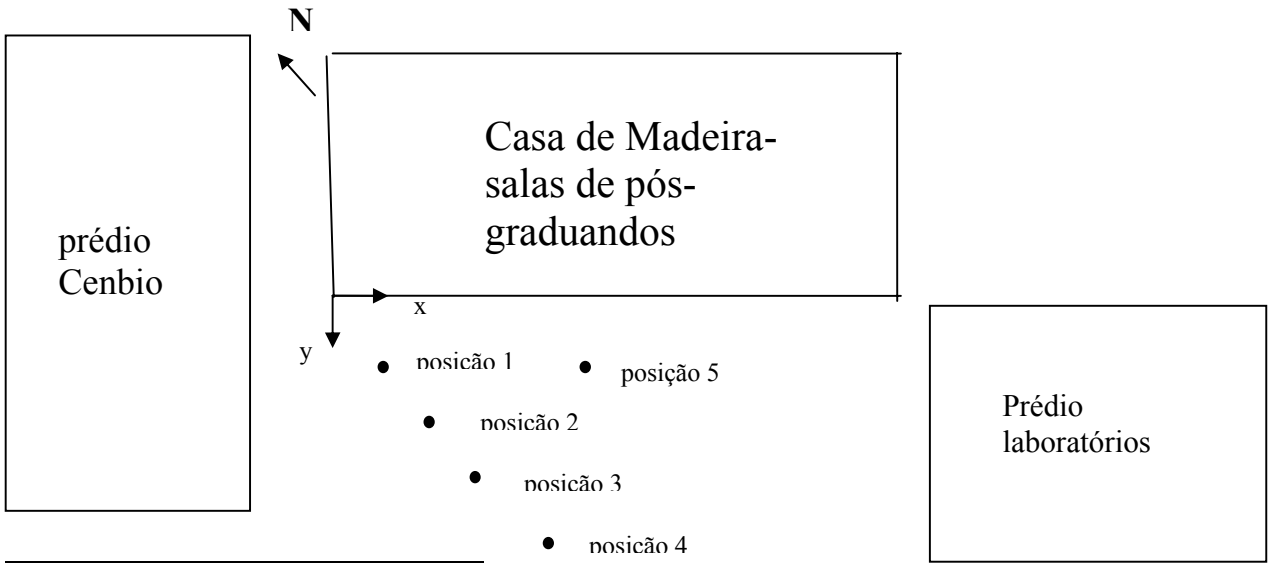
O equipamento usado nas coletas de dados para cálculo de condutividade e difusividade térmica foi desenvolvido pelo departamento de Geofísica do IAG. Com a introdução da agulha no solo, aquecimento e posterior acompanhamento da curva de temperatura dada pelo termistor, ele fornece medidas de resistência em função do tempo proporcionais à temperatura. Estes valores são anotados e depois introduzidos num programa gráfico de computador. As medições foram realizadas em 19/04/2001 na região compreendida entre os prédios do Cenbio; Salas de Aula e Salas de Pós-Graduandos do IEE, descrito na figura 3.19. A amostragem do solo foi realizada em cinco posições distintas e em algumas destas posições foi feita mais que uma amostragem.

A calibração foi feita em duas etapas:

a) Com utilização da tabela de calibração (tabela 3.2) fornecida pelo fabricante do termômetro de resistência (**ECI-88**) obtém-se a curva e parâmetros correspondentes (temperatura x resistência do termômetro de platina), mostrados na figura 3.20.

b) O termômetro de platina já calibrado foi mergulhado em água destilada no aparelho de "banho-maria" com temperatura controlada, marca HAAKE NK22 (figura3.21), juntamente com o termistor NTC para proceder à sua calibração. Os resultados obtidos podem ser observados na tabela 3.3. Para verificação de existência ou não de histereses, as medidas foram realizadas subindo gradativamente a temperatura até um valor máximo e depois descendo da mesma forma (figura3.22). Com a correspondência entre a temperatura do termômetro de platina e a resistividade do Termistor, a ponta de prova está calibrada para transformar valores de resistência elétrica em temperatura.

Os resultados obtidos e sua interpretação são apresentados no próximo capítulo.



coordenadas das posições de medida		
	x (metros)	y (metros)
posição 1	3,15	4,40
posição 2	5,20	7,30
posição 3	10,70	9,20
posição 4	12,00	11,80
posição 5	12,60	4,20

Figura 3.19 – Distribuição espacial dos furos de medida da condutividade e difusividade térmica do solo do IEE-USP

Tabela 3.2 – Dados de calibração fornecidos pelo fabricante do termômetro (**ECI-88)**

tabela de calibração do Termômetro de resistência de platina ECIL S.A					
folheto "Sensores p/ Medição de temperatura Cap.2 pag3					
	Temperatura			valor da	função obtida
	graus C			resistência	2,5834*R-258,44
				Ohms	
	0			100	-0,1
	5			101,953	4,94538
	10			103,904	9,985594
	15			105,851	15,01547
	20			107,795	20,0376
	25			109,737	25,05457
	30			111,675	30,0612
	35			113,611	35,06266
	40			115,543	40,05379
	45			117,472	45,03717
	50			119,399	50,01538
	55			121,322	54,98326
	60			123,243	59,94597
	65			125,16	64,89834

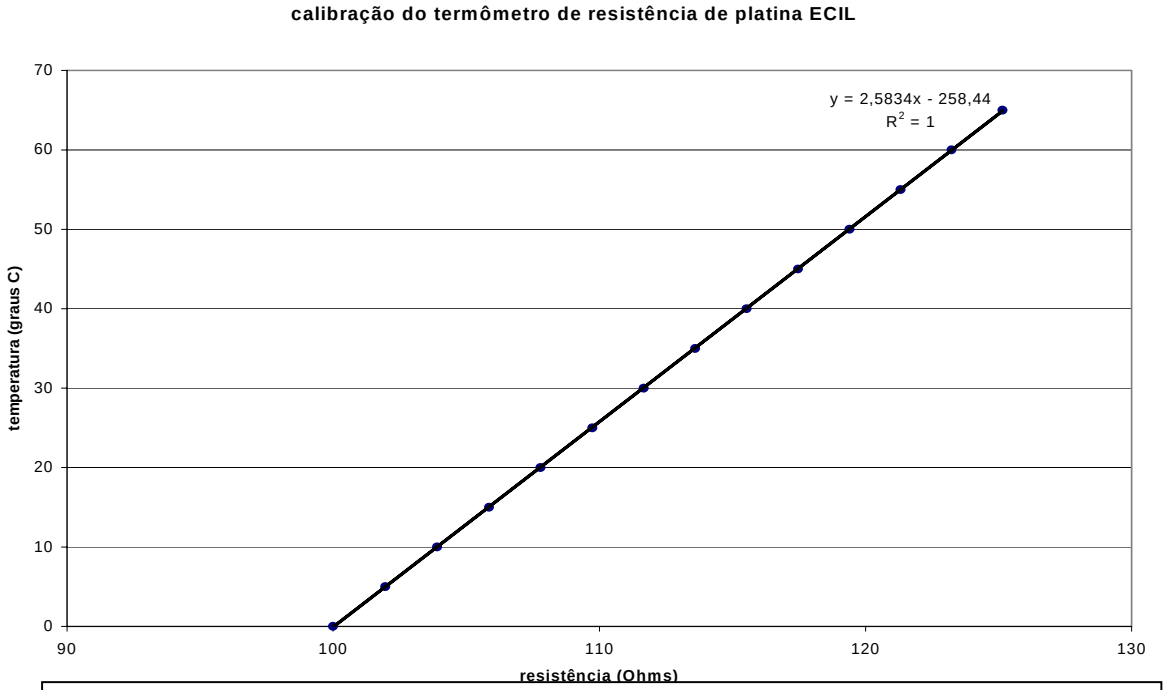


Figura 3.20 – Curva de calibração do termômetro ECIL e seus parâmetros de ajuste

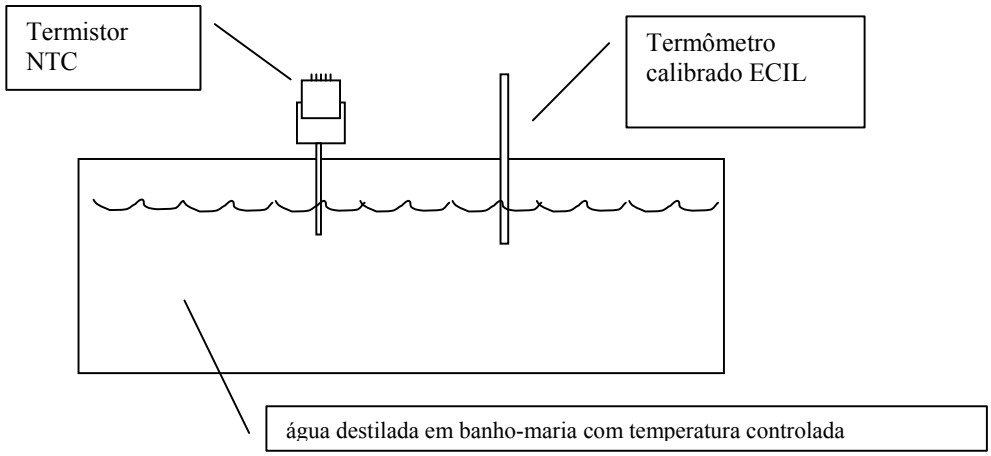


Figura 3.21 – arranjo experimental para calibração do termistor NTC (banho-maria HAAKE NK22)

calibração em R do termistor									
R termistor		R termômetro		transformação de R do				calibração	
NTC		ECIL		Temperatura (graus K)				termistor	
kOhm	Ohm	Ohm						em função de T	
				2.5834x-258.44+273.15				632.81*x^-0.1096	
1,359	1359	105,47	subida	287,2				287,0	
1,259	1259	106,35		289,5				289,4	
1,161	1161	107,31		291,9				292,0	
1,008	1008	109,04		296,4				296,5	
0,933	933	110		298,9				299,1	
0,846	846	111,25		302,1				302,3	
0,765	765	112,54		305,4				305,6	
0,719	719	113,36		307,6				307,7	
0,67	670	114,31		310				310,1	
0,62	620	115,34		312,7				312,8	
0,608	608	115,68		313,6				313,4	
0,719	719	113,4		307,7				307,7	
0,796	796	112,07		304,2				304,3	
0,576	576	116,37		315,3				315,3	
0,5147	514,7	117,96		319,4				319,2	
0,5	500	118,37		320,5				320,2	
0,4831	483,1	118,83		321,7				321,4	
0,4634	463,4	119,45		323,3				322,9	
0,513	513	117,99	descida	319,5				319,3	
0,5874	587,4	116,09		314,6				314,6	
0,6412	641,2	114,9		311,5				311,6	
0,722	722	113,31		307,4				307,6	
0,803	803	111,92		303,8				304,0	
0,89	890	110,59		300,4				300,6	
1,022	1022	108,87		296				296,1	
1,192	1192	107		291,1				291,1	
1,343	1343	105,59		287,5				287,4	
1,5001	1500	104,29		284,1				283,9	
1,672	1672	103,08		281				280,5	

Tabela 3.3 - Calibração em T do Termistor NTC

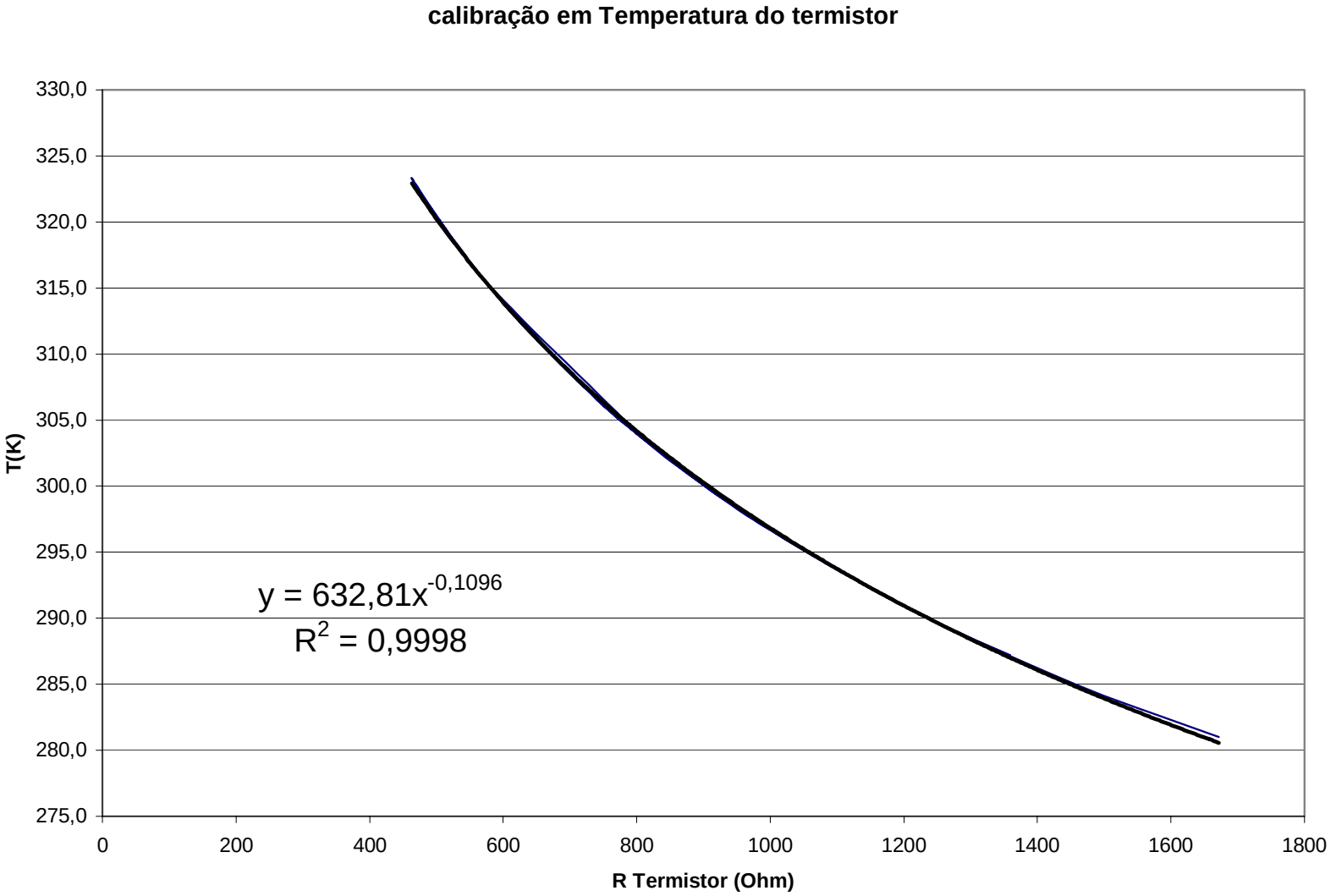


Figura 3.22 Curva de calibração em T do Termistor

Com a determinação das linhas de tendência das curvas T x t, obtém-se através da equação:

$$T = \frac{q}{4.\pi.k} \ln\left(\frac{4\alpha t}{B.a^2}\right) \qquad (3.1)$$

o coeficiente:

$$\frac{q}{4.\pi.k} \qquad (3.3)$$

onde:

q = potência elétrica dissipada na ponta de prova

k = condutividade térmica do meio (solo)

Como a difusividade térmica está relacionada com a condutividade térmica pela equação 3.2:

$$\alpha = \frac{k}{\rho.c} \qquad (3.2)$$

É necessário determinar os valores da densidade e do calor específico do solo para obter-se o valor de difusividade.

3.3.2) Cálculo da Densidade da Amostra de Solo do IEE-USP

A avaliação de densidade do solo do IEE-USP foi feita através da medida de massa de um volume determinado, tomando-se como amostra um cilindro de terra de 145mm de altura por 98mm de diâmetro (comumente chamado de testemunho) retirado do ponto x= 9,2 m e y= 7,7 m a aproximadamente 40 cm de profundidade, no dia 09/04/02. Normalmente se faz coleta de testemunhos em vários pontos e várias profundidades do terreno como forma de levar em conta as flutuações de densidade provocadas por diferentes composições do solo. Como a densidade depende fortemente da umidade do solo, que varia espacialmente e também ao longo do ano, regime de

chuvas, etc., deveria-se fazer coleta em vários pontos e várias profundidades de solo e a partir daí obter-se a densidade média do solo local. Dada a impossibilidade experimental, foi feita apenas uma coleta para obtenção da estimativa da densidade do solo. Usou-se um tubo de PVC de Φ_{ext}= 100mm e Φ_{int} = 98mm; h = 145mm que foi enterrado no solo após este ser descoberto até a profundidade de 35 cm. Entretanto, ocorreu uma deformação do tubo ao pressiona-lo contra o solo, formando em uma de suas extremidades um elipsóide com Φ_{menor} = 90mm Φ_{maior} = 102mm. Desta forma, temos duas áreas a serem levadas em conta:

$A_{superior} = 7{,}5\ 10^{-3}\ m^2$

$A_{inferior} = 7{,}2\ 10^{-3}\ m^2$

A comparação entre o volume de um cilindro regular com as dimensões citadas e um cilindro com base elipsoidal com as dimensões acima apresenta uma diferença de volume da ordem de 4%. Como o cilindro tem uma das faces na forma circular e outra na forma elíptica, a deformação atingiu no máximo até a metade do cilindro (e de forma decrescente), caindo esta diferença para menos de 2%.

Portanto, o volume total de terra é:

$$V = 1{,}1\ 10^{-3}\ m^3 (\pm \sim 2\%) \qquad (3.A)$$

A massa de terra foi calculada medindo-se a massa total do sistema terra + tubo de PVC e depois subtraída a massa do tubo:

$$m_{terra} = m_{total} - m_{tubo} = 2.029\ (\pm\ 1g) - 130\ (\pm 1\ g) = 1899\ g\ \pm 0{,}8\% \qquad (3.B)$$

E a densidade volumétrica do solo é obtida pela razão m/V:

3.3.3) Calor específico do solo (metodologia encontrada em **KIK-85)**

Há diversos métodos disponíveis para se medir o calor específico e a capacidade térmica do solo, como o método de agulhas duplas descrito por Campbell et al. (**CAM-91a**), que pode ser realizado no próprio solo, sem necessidade de levá-lo a laboratório e de alterar sua taxa de umidade. O método do calorímetro de aquecimento interno por resistência elétrica aqui aplicado foi escolhido pela disponibilidade do equipamento

construído nos laboratórios do IAG. A amostra de solo, a mesma utilizada para avaliação de sua densidade, foi pulverizada com granulação igual ou inferior a 0,149mm (100 mesh na escala Tyler/ABNT), homogeneizada mecanicamente e seca em estufa a 50^0C por 24 horas, que implica na obtenção de um valor de calor específico "médio" da mistura mineral que compõe a amostra, sem a presença de água. Alíquotas com massa entre 20g e 50g são introduzidas no calorímetro e, após o estabelecimento do equilíbrio térmico entre o calorímetro e a amostra, uma quantidade de energia térmica **ΔQ** é dissipada na resistência aquecedora do equipamento por um intervalo de tempo **Δt** -em geral da ordem de um minuto-.

Admitindo que o calorímetro seja adiabático, a variação de temperatura em seu interior será dado por:

$$\Delta Q = (E + mc)\Delta T \qquad (3.4)$$

onde:
E = capacidade calorífica do calorímetro
c = calor específico da amostra
m = massa da amostra

A capacidade calorífica do calorímetro (E) pode ser determinada substituindo-se a amostra por alíquota de um padrão de sílica fundida (SiO_2 amorfa) granulada, que possui calor específico bem determinado e disponível na literatura ($c_{\text{sílica amorfa}}$ = 740 J/kg.K a 25^0C).

Entretanto, como o calorímetro não é perfeitamente adiabático, ele perde uma pequena parte da energia térmica gerada de seu interior para o exterior. Assim, para um calorímetro real, a equação (2.4) deve ser substituída por:

$$\Delta Q = (E + mc)\Delta T_{\max} + \varphi \qquad (3.5)$$

onde:

ΔT_{max} = temperatura máxima atingida pelo calorímetro após a injeção da quantidade de energia térmica "ΔQ" ;"φ" é a quantidade de energia térmica perdida para o exterior até o instante em que T_{max} é atingido.

Apesar desta quantidade de energia térmica φ ser pequena -devido à própria construção do calorímetro-, ela constitui uma fonte de erro sistemático que pode ser minimizado (quase eliminado) fazendo-se medidas relativas de calor específico em que se compara a variação de temperatura do calorímetro na presença de uma amostra (ΔT_a) com a variação de temperatura do calorímetro na presença de um padrão de calor específico (ΔT_p), o que resulta em:

$$\Delta Q_a = \left(E + m_a c_a\right)\Delta T_a + \varphi_a \tag{3.6}$$

$$\Delta Q_p = \left(E + m_p c_p\right)\Delta T_p + \varphi_p \tag{3.7}$$

onde:

a refere-se a amostra

p refere-se ao padrão

Reorganizando os termos e dividindo uma pela outra resulta:

$$c_a = \frac{m_p}{m_a} c_p + \frac{1}{m_a}\left(\frac{\Delta Q_a}{\Delta T_a} - \frac{\Delta Q_p}{\Delta T_p} + \frac{\varphi_p}{\Delta T_p} - \frac{\varphi_a}{\Delta T_a}\right) \tag{3.8}$$

Se φ_a e φ_b forem pequenos e ΔT_a e ΔT_p compatíveis, os efeitos de perda de energia térmica praticamente se anulam. Assim, pode-se escrever, com boa aproximação:

$$c_a = \frac{m_p}{m_a} c_p + \frac{1}{m_a}\left(\frac{\Delta Q_a}{\Delta T_a} - \frac{\Delta Q_p}{\Delta T_p}\right) \tag{3.9}$$

Com este procedimento, além do quase total cancelamento do efeito de perda de energia térmica, a medida comparativa dispensa a necessidade de cálculo da capacidade calorífica

do calorímetro. A precisão na avaliação do calor específico fica submetida apenas à precisão na medida das grandezas envolvidas na equação (3.9). Cabe ressaltar que, por melhor que seja a medida de uma amostra de solo, ela dificilmente irá representar com precisão uma determinada área de terra, devido à quantidade de variáveis envolvidas que podem alterar suas propriedades físicas (mudanças de composição, umidade, atividade orgânica, etc). Assim, para a obtenção de valores médios representativos –e com boa precisão- da condutividade térmica, densidade e calor específico de uma dada região de solo por coleta de amostras, deve-se fazer um grande número de pontos de amostragem e a distribuição destes pontos deve ser homogênea.

3.3.3.1) Arranjo Experimental

O calorímetro é composto de uma ampola de garrafa térmica envolvida por isolante térmico em cujo interior foi introduzido um cilindro ôco de cobre envolvido por uma resistência elétrica que se encarregará de aquecê-lo por dentro. A amostra de material é introduzida neste interior e o termistor logo em seguida, garantindo que esteja no eixo do cilindro. As medidas de corrente e tensão de uma fonte são aplicadas na resistência e monitoradas por dois multímetros, enquanto um terceiro multímetro é utilizado para medir a resistência do termistor. (figuras 3.23; 3.24 e 3.25)

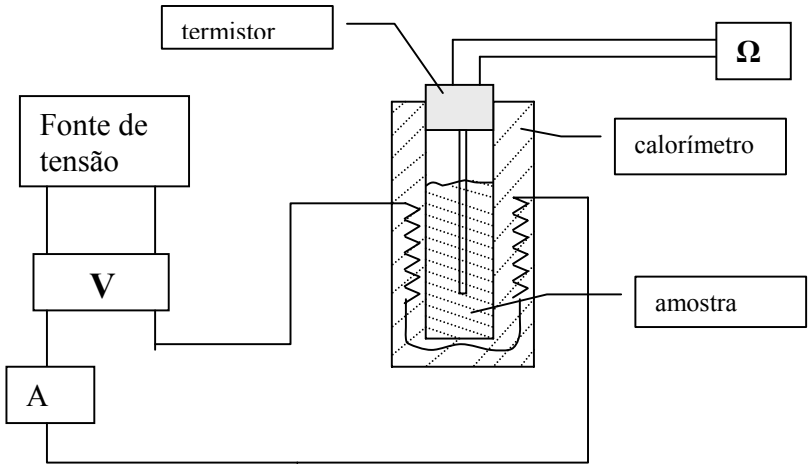


Figura 3.23 Arranjo esquemático do equipamento para medida de calor específico (laboratório de geofísica do IAG-USP)

Foram realizadas medidas com a sílica padrão e outro com amostra de solo, duas vezes cada uma a fim de verificar possíveis discrepâncias devido a histereses e/ou retenção de energia térmica no interior do calorímetro. Os valores obtidos são mostrados em tabela e gráficos de onde se pode extrair os valores de ΔT e, a partir deles, os valores de calor específico do solo (tudo isto apresentados no próximo capítulo).

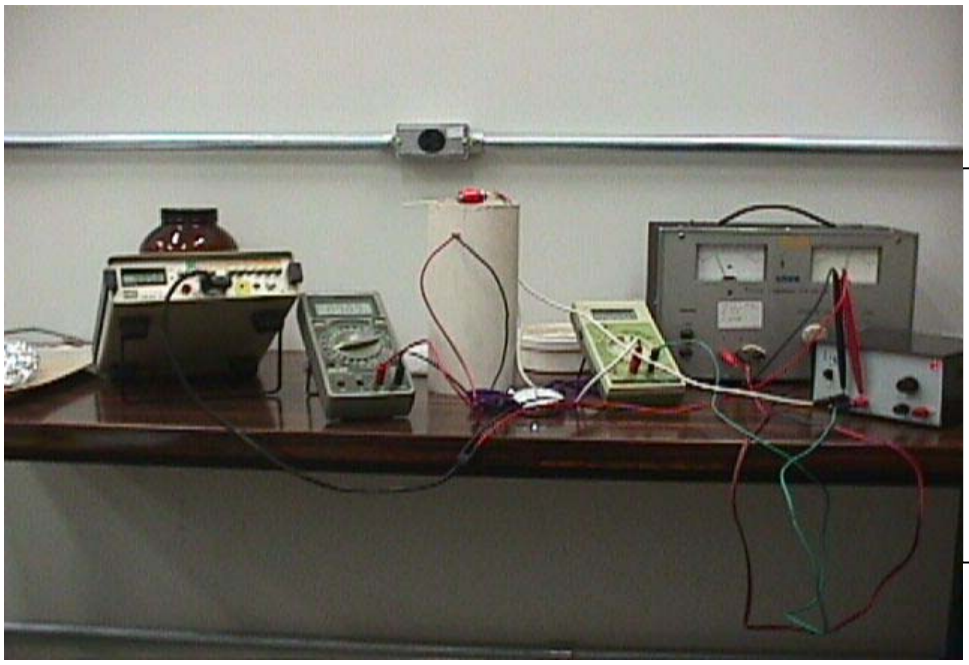


Figura 3.24 Fotografia do equipamento de medição de calor específico

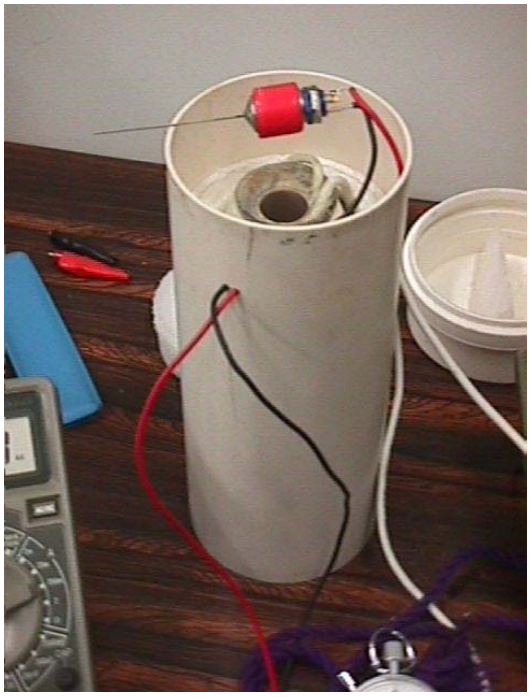


Figura 3.25 Detalhe do Calorímetro utilizado, juntamente com o termistor

CAPÍTULO 4 Resultados Obtidos

São apresentadas as medidas de temperatura do solo e medidas de temperatura ambiente fornecidas pelo IAG; tratamento de dados e comparação dos dois conjuntos. É calculada a difusividade por defasagem e atenuação de onda. Através de amostra de solo coletado no IEE, são medidas -em laboratório do IAG- a condutividade, calor específico e densidade do solo. O resultado do cálculo de difusividade obtido pela relação entre condutividade, calor específico e densidade é comparado com os resultados obtidos através do método de "Onda de Calor".

4.1) Temperatura do Solo

O acompanhamento de temperatura do solo, edifício e entorno foi realizado durante 1997 e uma parte de 1998. .Os dados coletados durante todo o tempo de operação do sistema são mostrados separadamente, no conjunto de figuras 4.1a; 4.1b e 4.1c, apresentados em uma planilha EXCEL95 -ao todo, 110 dias não contínuos, ao longo de aproximadamente 1 ano, com medidas a cada 15 minutos, a partir de 04/04/97-.

Os resultados obtidos do perfil de temperatura do solo são apresentados separadamente, em 2 partes, nas figuras 4.2a e 4.2b, onde os termômetros localizados no solo a 3 cm, 1 metro e 2 metros de profundidade são comparados com a temperatura externa medida sob a copa da árvore. Observa-se a grande amplitude de variação da temperatura ambiente em contraste com as oscilações do solo, que diminui à medida que a profundidade aumenta. O termômetro localizado a 3 cm de profundidade acompanha as variações de temperatura externa, mas com forte atenuação em sua amplitude.

A 1 metro de profundidade a oscilação diária desaparece, permanecendo apenas a oscilação de grande período. A escala de tempo utilizada já permite a observação da oscilação da onda com período anual, também já pode-se observar a diminuição da amplitude em comparação com o termômetro a 3 cm de profundidade. O deslocamento de fase ainda não está evidente. A 2 metros de profundidade o comportamento da temperatura é ainda mais discreto. Na escala utilizada, a temperatura já mostra a forte influência da inércia térmica do solo.

Em todos os termômetros localizados no solo verificaram-se oscilações de alta freqüência, com períodos menores que um dia. A 3 cm de profundidade esta oscilação é esperada, mas a 1 metro de profundidade a variação de curto período já foi eliminada pela inércia do solo. Assim, elas devem ser oriundas de ruídos no sistema de aquisição.

Figura 4.1a – Perfil de T x t nos oito sensores de temperatura distribuídos no solo e interior do prédio de madeira ocupado pelos alunos do PIPGE (1ª. parte)

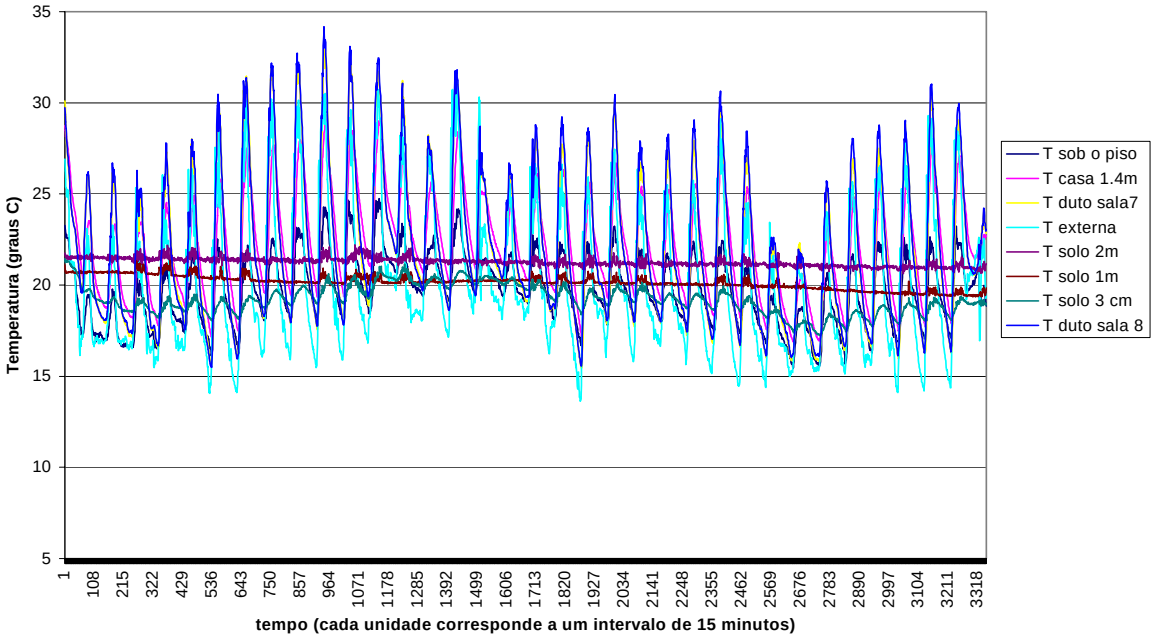


Figura 4.1b Conjunto de dados do segundo terço do período

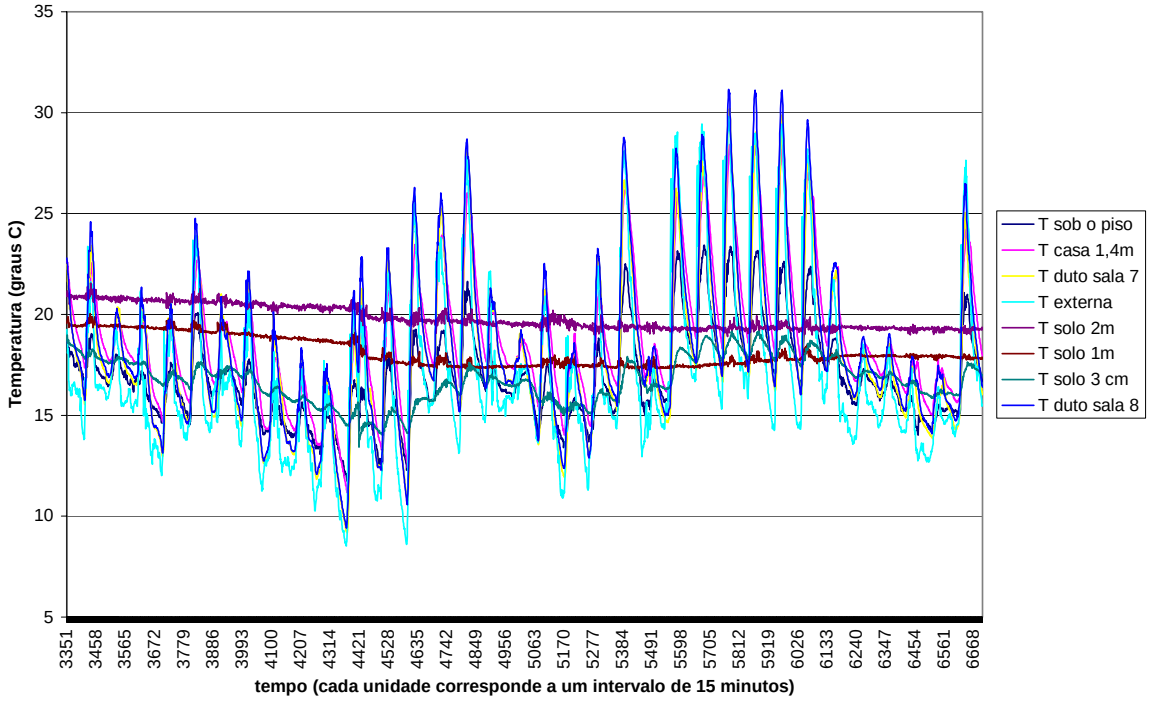

Temperatura (graus C)
tempo (cada unidade corresponde a um intervalo de 15 minutos)
T sob o piso
T casa 1,4m
T duto sala 7
T externa
T solo 2m
T solo 1m
T solo 3 cm
T duto sala 8

Figura 4.1c Terceira parte do conjunto de dados

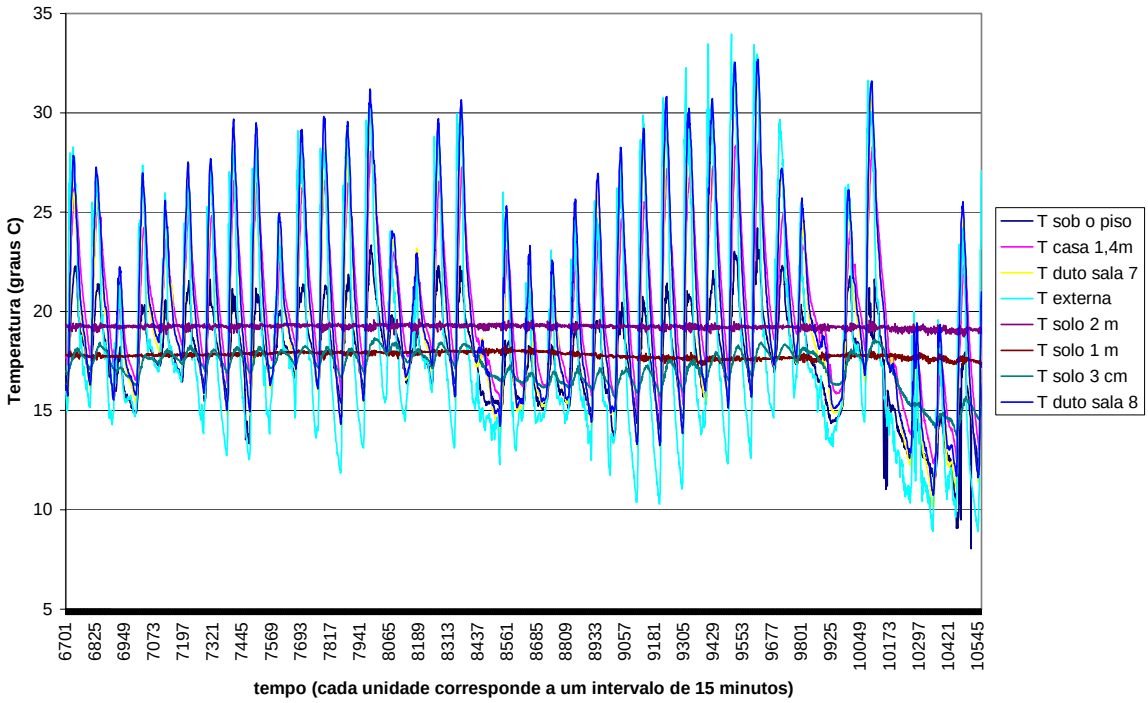

Temperatura (graus C)
tempo (cada unidade corresponde a um intervalo de 15 minutos)
T sob o piso
T casa 1,4m
T duto sala 7
T externa
T solo 2 m
T solo 1 m
T solo 3 cm
T duto sala 8

Figura 4.2a Perfil de T x tempo em 3 profundidades do solo e o comportamento da temperatura do ar externo

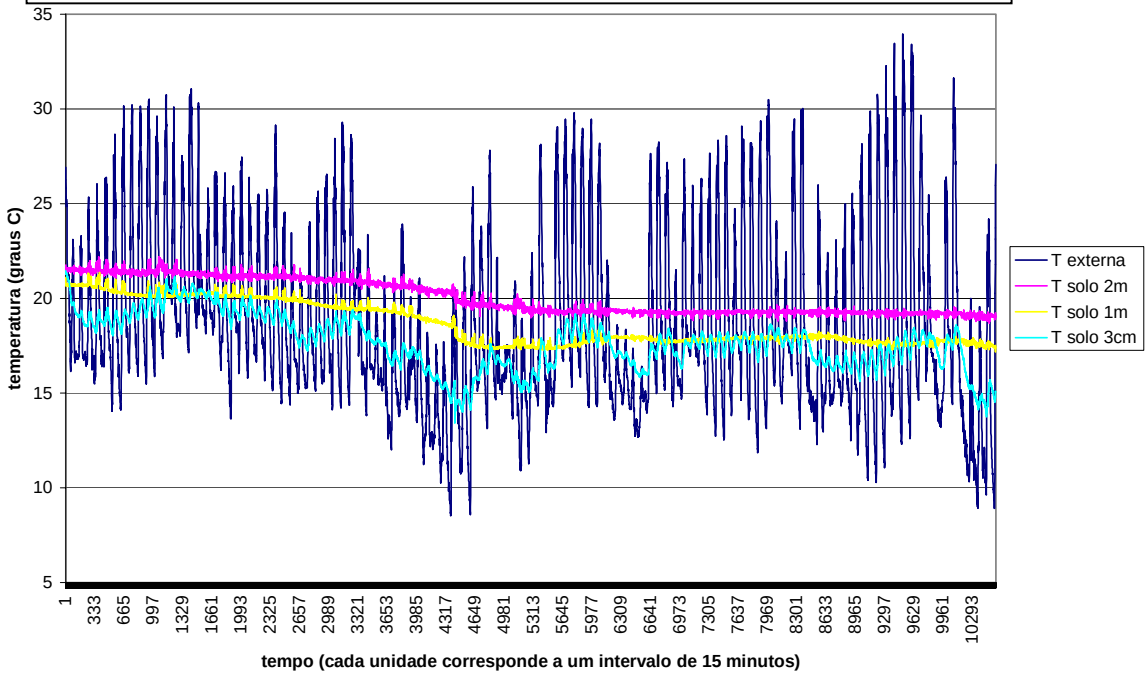
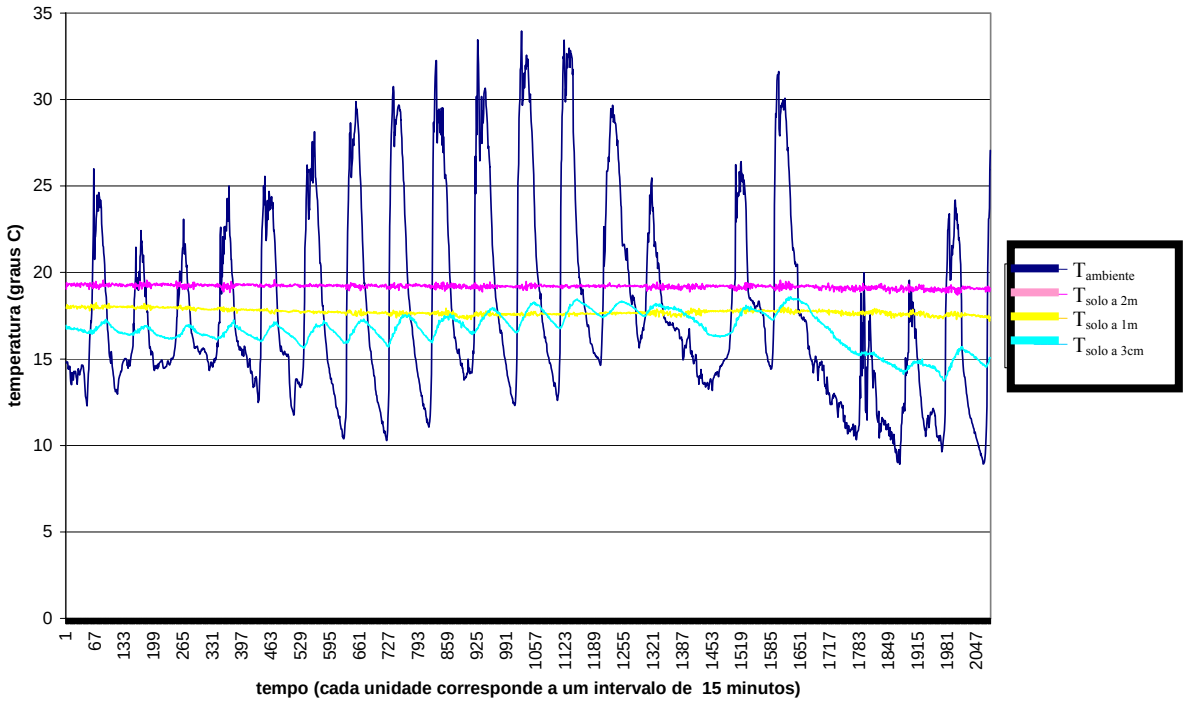
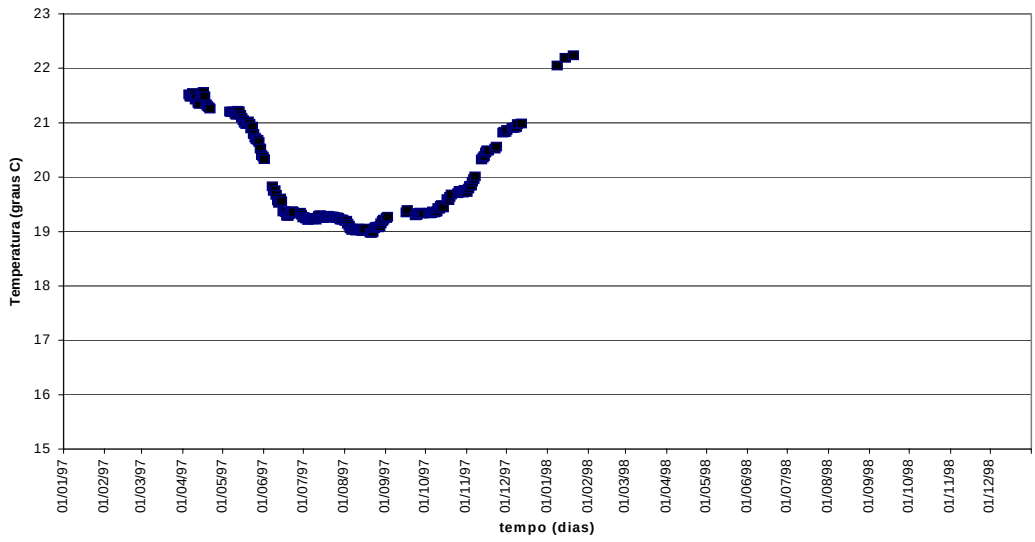


Figura 4.2b Perfil T x t em 3 profundidades do solo e o comportamento do ar externo


temperatura (graus C)
tempo (cada unidade corresponde a um intervalo de 15 minutos)
T ambiente
T solo a 2m
T solo a 1m
T solo a 3cm

O que interessa à instalação de um sistema GSHP é a avaliação das propriedades termofísicas do solo na profundidade em que este equipamento será instalado. Como a profundidade padrão para sistemas GSHP horizontais é da ordem de 2 metros, o tratamento dos dados de temperatura do solo se restringe a esta profundidade. A figura 4.3 apresenta a curva de temperatura do solo do IEE a 2 metros de profundidade no período de cerca de um ano.

Figura 4.3 Medidas experimentais da evolução da temperatura do solo do IEE, a 2 metros de profundidade



4.2) Curva de Temperatura ambiente fornecida pelo IAG

Para colocar os dados de temperatura em uma forma conveniente, fez-se um tratamento de "alisamento" da curva, aplicando um cálculo de média móvel de trinta dias, apresentado na figura 4.4. Optou-se por este intervalo de tempo porque, em intervalos menores, ainda era possível observar oscilações de freqüências indesejadas. Com intervalo de tempo maior, a curva começa a perder seu caráter oscilatório com a conseqüente perda de informação.

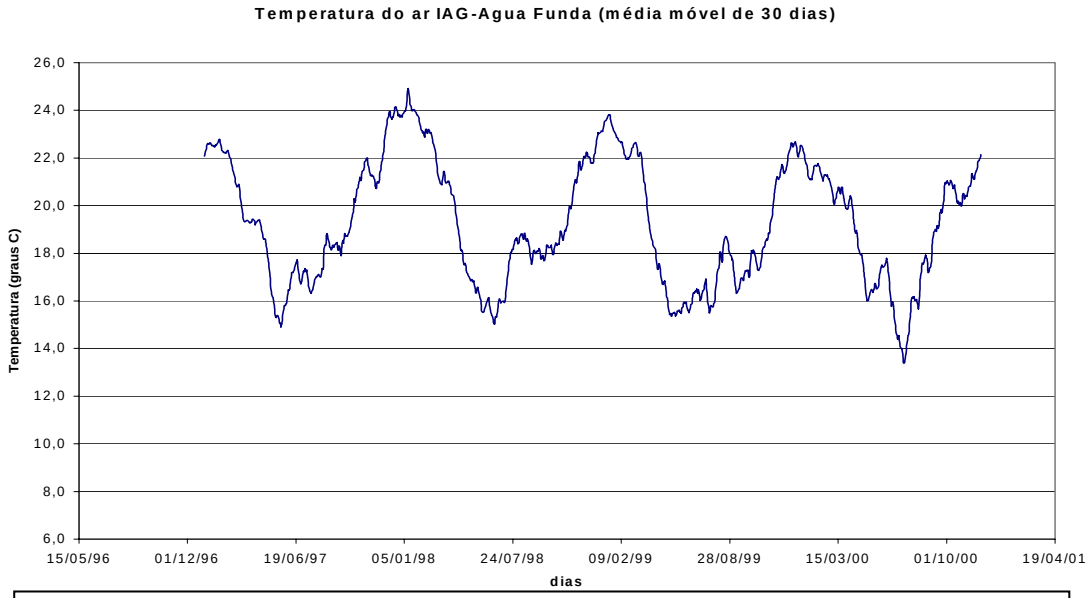


Figura 4.4 Curva "alisada" das medidas de temperatura fornecidos pelo IAG-USP-Água Funda, com média móvel de 30 dias

Na figura 4.5 foram somados os dados fornecidos pelo IAG com os dados de temperatura do solo medidos no IEE a 2 metros de profundidade.

A utilização de valores de temperatura ambiente de local distinto de onde se realizou a coleta de temperatura do solo poderia provocar distorções no estudo das propriedades termofísicas, uma vez que é praticamente impossível garantir que as condições ambientais sejam iguais. Mas como a dois metros de profundidade o próprio solo se encarrega de fornecer um valor médio de temperatura local e a temperatura ambiente é submetida ao cálculo de média móvel de 30 dias, tem-se a utilização, nos dois casos, de valores médios que anulam as pequenas diferenças de variação que possam ocorrem por estarem em sítios diferentes. Além do mais, se estas diferenças fossem significativas, certamente haveria discrepância entre os resultados

da avaliação da difusividade do solo entre os métodos de atenuação e deslocamento de onda. Como será visto mais tarde, esta diferença não foi verificada.

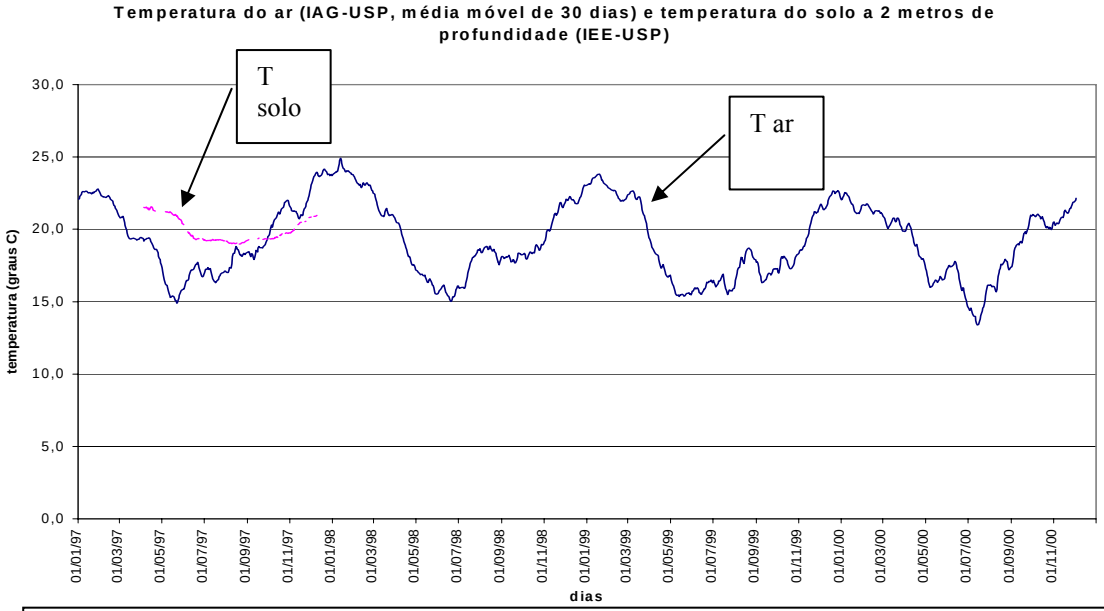


Figura 4.5 Superposição dos dados experimentais de temperatura ambiente obtidos no IAG-USP com os obtidos no subsolo do IEE-USP a 2 metros de profundidade

4.3 Cálculo de difusividade do solo pelo método de "onda de calor"

4.3.1) Por Atenuação da Onda

A partir das funções que descrevem o comportamento de T_{ar} e T_{solo} dadas pelas equações:

$$T_{ar} = T_0 \, sin(wt) \qquad \text{(I.1)}$$

$$T_{solo} = T_0 e^{-x\sqrt{w/2\alpha}} sin(wt - x\sqrt{\frac{w}{2\alpha}}) \qquad \text{(I.2)}$$

e dos valores extremos de temperatura retirados das duas curvas apresentadas na figura 4.5, calculou-se as amplitudes de onda. Do período de amostragem fornecido pelo IAG, de 1997 a 2000, apenas o período 1997 foi utilizado, para manter a correspondência entre as duas curvas:

$T_0 = 3{,}9^0C$

$T_R = 2{,}49^0C$

x = 2 metros

Obtendo-se para difusividade:

$$\alpha = 0{,}001\ m^2/h \qquad (4.A)$$

4.3.2) Por Deslocamento de Fase

Usando os valores de mínimo de temperatura ambiente e de temperatura do solo a 2 metros de profundidade, figura 4.6, obtém-se um atraso de :

$$\Delta t = 91 dias = 0{,}499\pi = x\sqrt{\frac{w}{2\alpha}}$$

(4.1)

onde:

$w = 2\pi/P$

P=8766 horas

E um valor de difusividade:

$$\alpha = 0{,}001\ m^2/h \qquad (4.B)$$

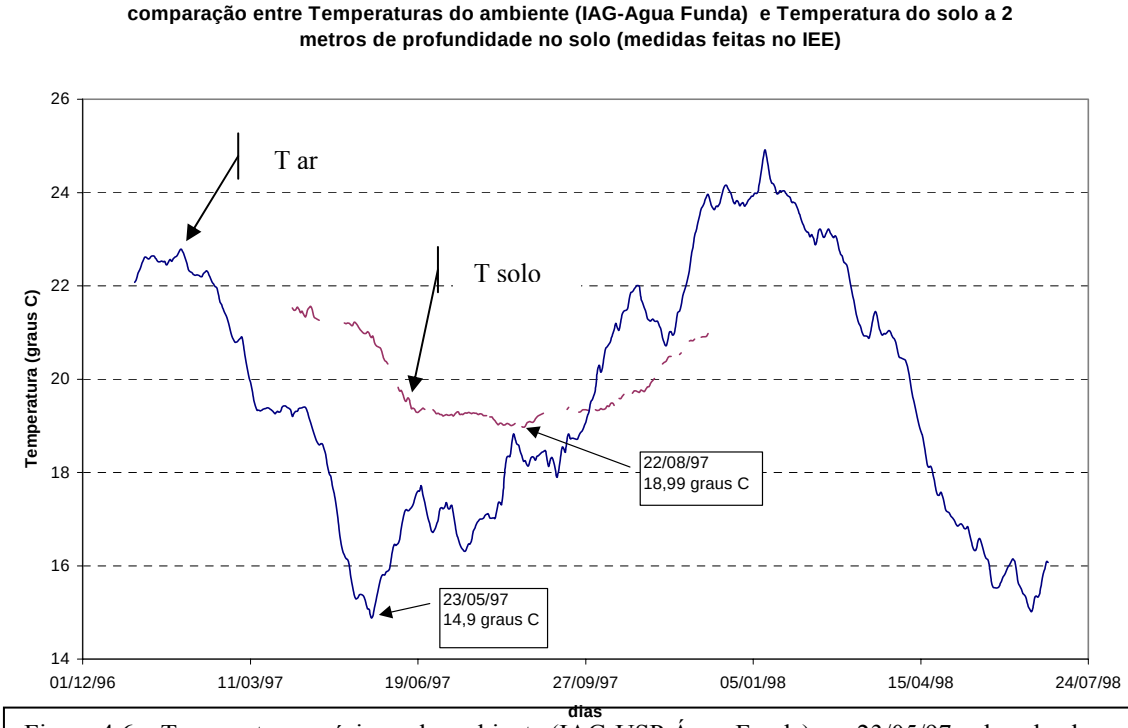


Figura 4.6 – Temperaturas mínimas do ambiente (IAG-USP Água Funda) em 23/05/97 e do subsolo a 2 metros de profundidade (IEE-USP) em 22/08/97, devido ao atraso e atenuações inerentes.

4.3.3) Ajuste de curva por Chi quadrado

As incertezas envolvidas neste tipo de cálculo são apreciáveis e de difícil avaliação. Como a composição e teor de umidade do solo podem variar substancialmente ao longo do ano e localmente, em profundidade, estas variações geralmente são muito maiores que as incertezas dos cálculos. A difusividade obtida em um determinado local pelos métodos de atraso e/ou atenuação de onda representam um "valor médio de difusividade" de uma determinada região e as variações locais já devem estar embutidas neste valor médio.

Uma tentativa de diminuição das incertezas foi feita com a introdução de um ajuste senoidal por Chi quadrado, executado com o programa ORIGIN, cujos ajustes são mostrados nas figuras 4.7 e 4.8. Na figura 4.8 observou-se um ajuste de chi quadrado muito pequeno, mostrando que a avaliação do ponto de mínimo da função está muito prejudicada (numa avaliação grosseira, pode-se supor diferenças de vários dias – até semanas - entre os dois mínimos). A superposição das duas curvas fornece a figura 4.9.

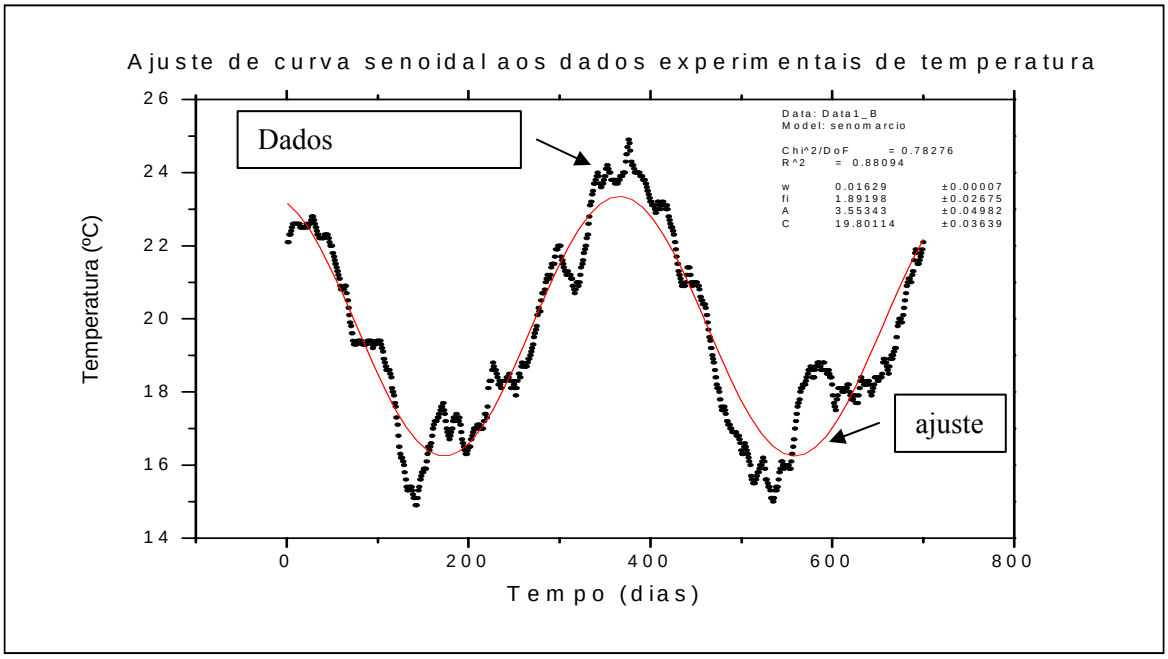


Figura 4.7 ajuste de curva senoidal por chi quadrado feito pelo programa ORIGIN para a temperatura ambiente IAG-USP

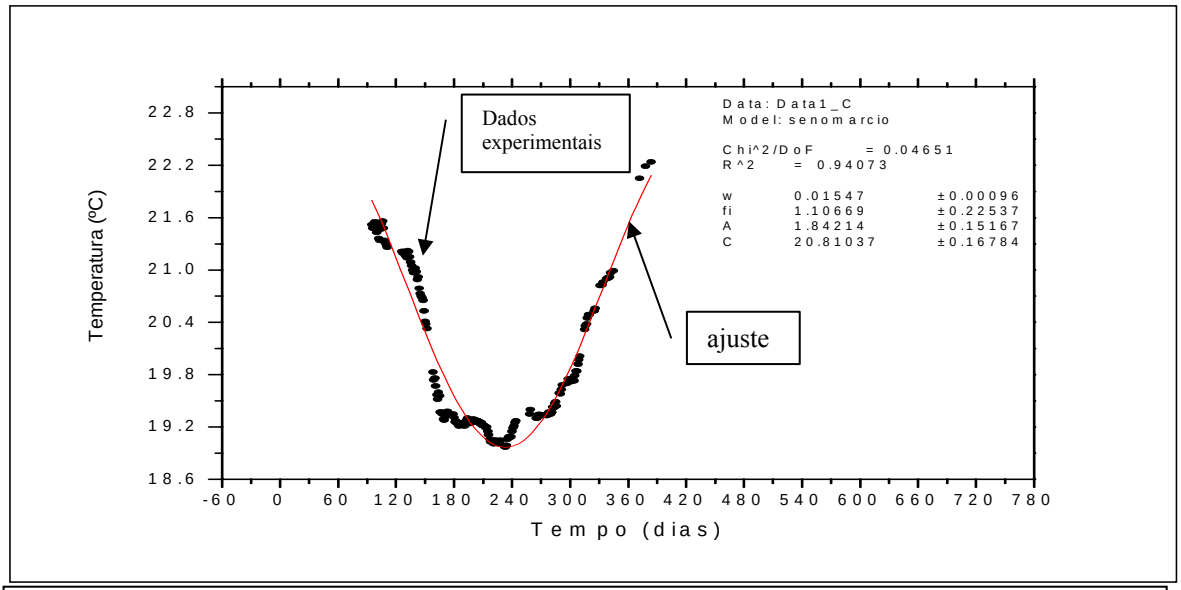


Figura 4.8 ajuste de curva senoidal por chi quadrado feito pelo programa ORIGIN para a temperatura do solo a 2m IEE-USP

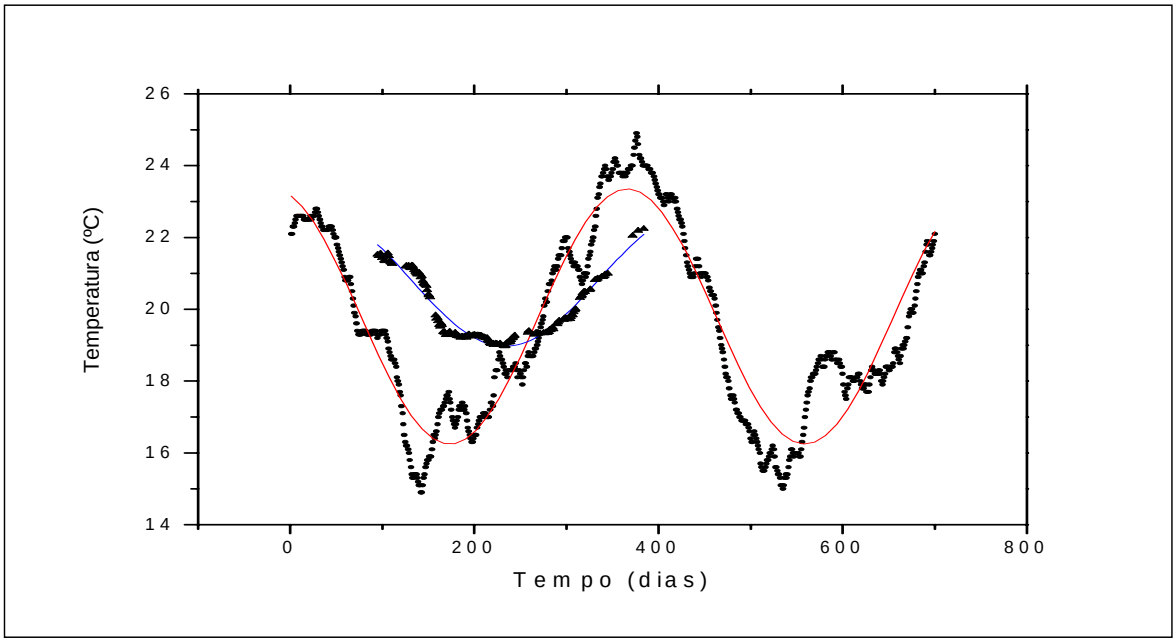


Figura 4.9 Superposição das curvas e ajustes senoidais de Tambiente e Tsolo a 2 m

Tomando-se os valores mínimos das senóides ajustadas:

Tempo para $T_{.mínima}^{ambiente} = dia166$

Tempo para $T_{mínima}^{solo} = dia235$

Com $\Delta t = 69$ dias $= 0{,}38\pi = x\sqrt{\frac{w}{2\alpha}}$ (4.2)

logo:

$$\alpha = 0{,}001 \text{ m}^2/\text{h} \qquad \text{(4.C)}$$

Os resultados apresentados em (4.A) e (4.B) mostram concordância entre si. Com a utilização de ajuste de curvas, o resultado apresentado em (4.C) também mostra boa concordância com os valores anteriores.

Uma incerteza na determinação dos valores mínimos das senóides da ordem de 5 dias ($\Delta t \pm 5$ dias) implicaria uma incerteza na determinação da difusividade térmica da ordem de:

$\Delta t = +5$ dias $\rightarrow \alpha = 9{,}1.10^{-4}$ ou $\Delta\alpha$ de -9% (4.D)

$\Delta t = -5$ dias $\rightarrow \alpha = 1{,}2.10^{-3}$ ou $\Delta\alpha$ de +20% (4.E)

O que dá uma idéia da sensibilidade do método para a avaliação da difusividade térmica.

4.4) Medidas de Condutividade e Difusividade Térmica do Solo pelo Método de Agulha de Prova, Densidade (por gravimetria) e Calor Específico (pelo Calorímetro)

A difusividade térmica pode ser calculada pela equação (3.2), desde que se tenha disponível as medidas de condutividade, densidade e calor específico do solo.

4.4.1) Condutividade Térmica

As medidas temperatura do solo em função do tempo de aquecimento, para cálculo de condutividade térmica do solo pelo método de agulha de prova são apresentadas na tabela 4.1, onde são mostradas as medidas em 5 posições diferentes.

		posição 1										
tempo	Temperatura (K)			posição 2		posição 3		posição 4		posição 5		
(s)	medida 1	m2	m3	m1	m2	m1	m2	m1		m1	m2	
0,0	296,6	296,8	296,5	297,1	297,0	297,4	297,8	297,1		296,5	296,5	
5,0	306,9	307,6	305,8	309,9	307,3	299,7	299,6	305,0		298,2	298,6	
10,0	311,1	311,9	309,4	317,1	310,2	300,0	299,9	307,6		298,5	298,9	
15,0	312,2	313,2	310,7	320,2	311,2	300,2	300,0	308,9		298,6	299,0	
20,0	312,7	313,7	311,2	321,6	311,8	300,3	300,1	309,8		298,7	299,1	
25,0	313,0	314,0	311,5	322,2	312,2	300,4	300,2	310,3		298,8	299,2	
30,0	313,3	314,2	311,6	322,5	312,4	300,5	300,3	310,7		298,9	299,2	
35,0	313,4	314,4	311,7	322,7	312,7	300,6	300,3	311,1		299,0	299,2	
40,0	313,7	314,5	311,8	322,8	312,9	300,7	300,4	311,4		299,1	299,3	
45,0	313,8	314,6	311,9	322,9	313,0	300,7	300,4	311,6		299,1	299,3	
50,0	314,0	314,7	312,0	322,9	313,2	300,8	300,5	311,7		299,2	299,4	
55,0	314,1	314,7	312,0	323,0	313,4	300,8	300,5	311,9		299,2	299,4	
60,0	314,1	314,7	312,1	323,0	313,6	300,8	300,5	312,0		299,2	299,4	
65,0	314,2	314,8	312,1	323,0	313,7	300,9	300,5	312,1		299,2	299,5	
70,0	314,2	314,8	312,2	323,1	313,8	300,9	300,6	312,2		299,3	299,5	
75,0	314,3	314,8	312,2	323,1	314,0	300,9	300,6	312,3		299,3	299,5	
80,0	314,3	314,9	312,2	323,2	314,0	301,0	300,6	312,4		299,3	299,5	
85,0	314,4	314,9	312,3	323,2	314,1	301,0	300,6	312,5		299,4	299,5	
90,0	314,4	314,9	312,3	323,2	314,2	301,0	300,6	312,6		299,4	299,6	
95,0	314,5	315,0	312,3	323,2	314,3	301,0	300,7	312,6		299,4	299,6	
100,0	314,5	315,0	312,3	323,3	314,4	301,1	300,7	312,6		299,4	299,6	
105,0	314,5	315,0	312,3	323,3	314,5	301,1	300,7	312,7		299,4	299,6	
110,0	314,5		312,4	323,3	314,5	301,1	300,7	312,8		299,4	299,6	
115,0	314,6		312,4	323,3	314,6	301,1	300,7	312,8			299,6	
120,0	314,7		312,4	323,3	314,7	301,1	300,7	312,9			299,6	
125,0	314,7		312,4	323,3	314,8	301,1	300,7	312,9				
130,0	314,7		312,5	323,3	314,8	301,1	300,7	312,9				
135,0	314,7		312,5	323,4	314,9	301,1	300,8	313,0				
140,0			312,5	323,4	314,9	301,2	300,8	313,0				
145,0			312,5	323,4	315,0	301,2	300,8	313,0				
150,0			312,6		315,1	301,2	300,8	313,1				
155,0			312,6		315,1	301,2	300,8	313,1				
160,0			312,6		315,1	301,2	300,8	313,2				
165,0			312,6		315,2	301,2	300,8	313,2				
170,0			312,6		315,2	301,3	300,8	313,2				
175,0			312,6		315,2	301,3	300,8	313,3				
180,0					315,2	301,3	300,8	313,3				
185,0					315,3	301,3		313,3				
190,0					315,3	301,3		313,3				
195,0					315,4	301,3		313,3				
200,0					315,4	301,3		313,4				
205,0					315,4	301,3		313,4				
210,0					315,4	301,3		313,4				
215,0					315,4	301,3		313,4				
220,0					315,5	301,3		313,5				
225,0					315,5			313,5				
230,0					315,5			313,5				
235,0					315,5			313,6				
240,0					315,6							

Tabela 4.1 – Temperatura do solo em função do tempo fornecido pela agulha de prova em 5 pontos diferentes no IEE-USP

A partir destas tabelas, foram construídos os gráficos para obtenção do coeficiente da assíntota dada pela equação (3.3) em todas as medidas realizadas.

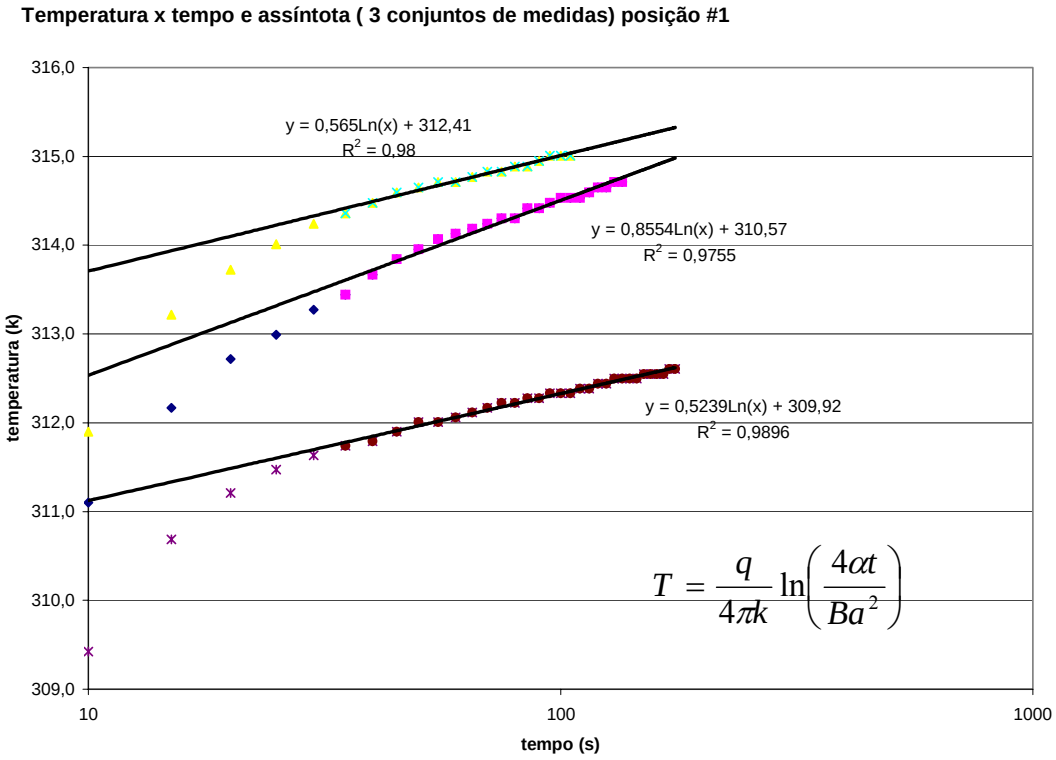


Figura 4.10– gráfico de Temperatura(K) x t(s) obtido pelo termistor NTC na ponta de prova em 3 medidas seqüenciais no furo #1 e respectivas funções das assintotas

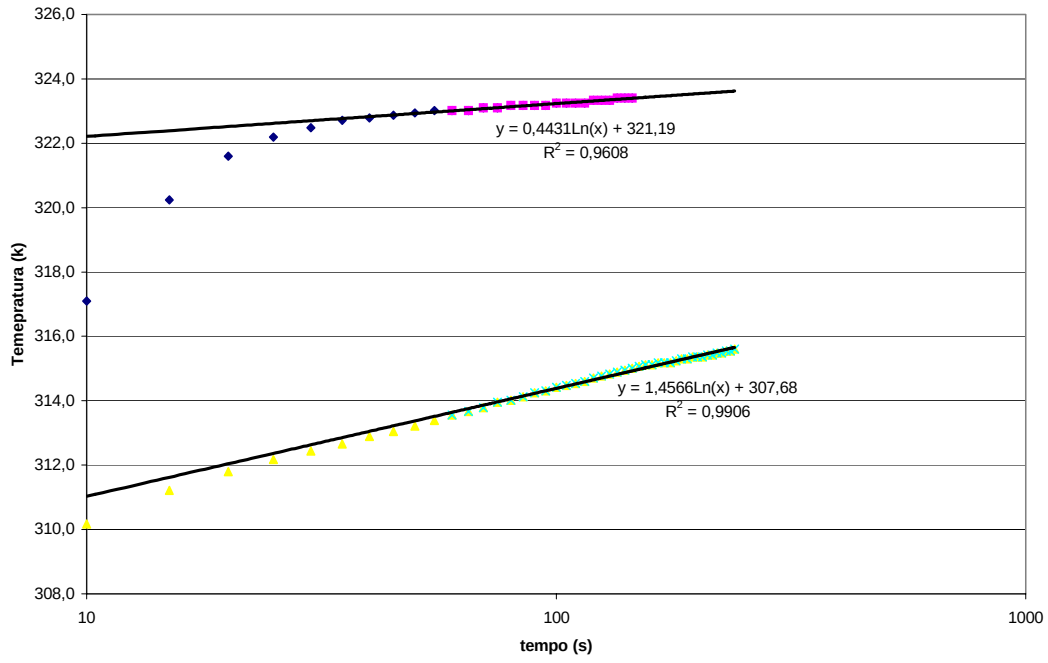


Figura 4.11 – gráfico de Temperatura(k) x t(s) obtido pelo termistor NTC na ponta de prova em 2 medidas seqüenciais no furo #2 e respectivas funções das assintotas

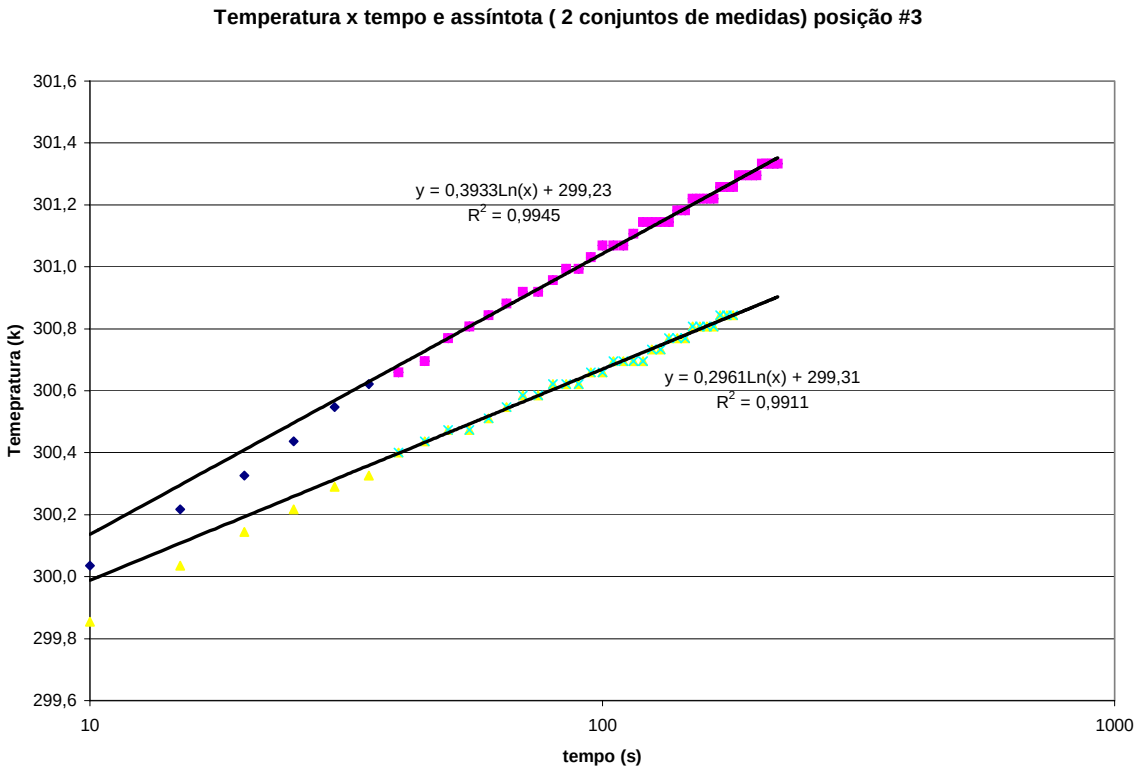


Figura 4.12 – gráfico de Temperatura(k) x t(s) obtido pelo termistor NTC na ponta de prova 2 medidas sequenciais no furo #3 e respectivas funções das assintotas

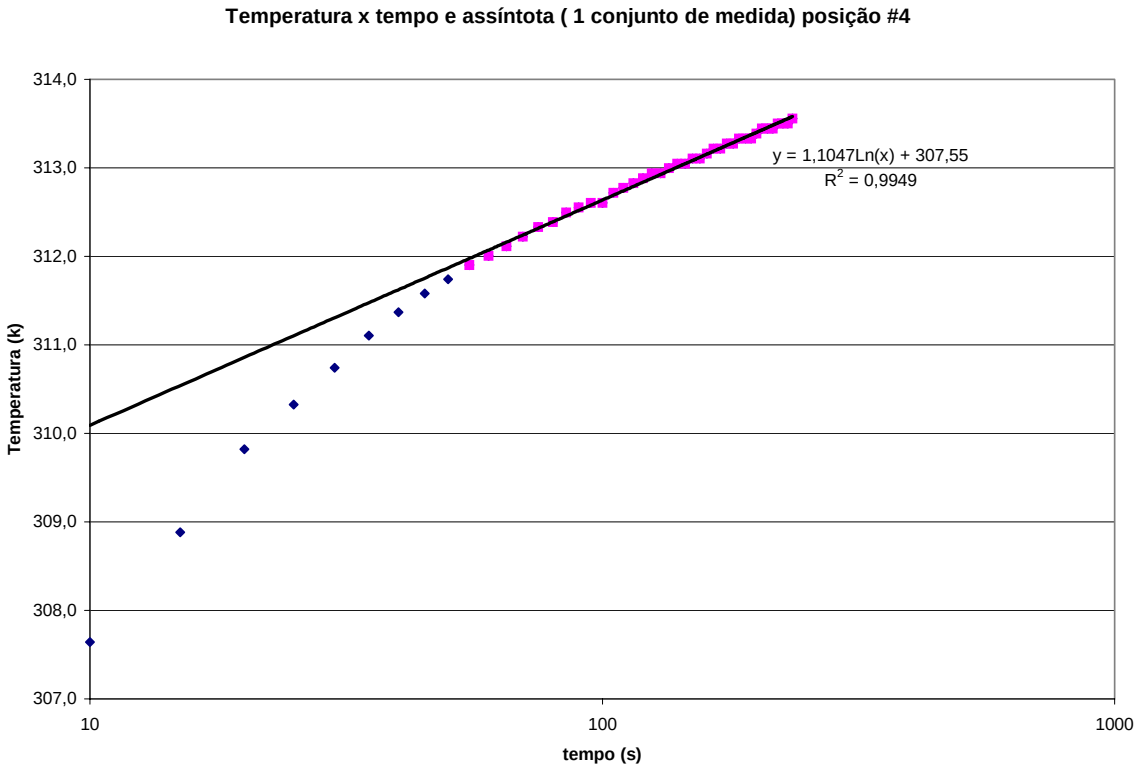


Figura 4.13 – gráfico de Temperatura(k) x t(s) obtido pelo termistor NTC na ponta de prova
1 medida no furo #4 e respectiva função da assintota

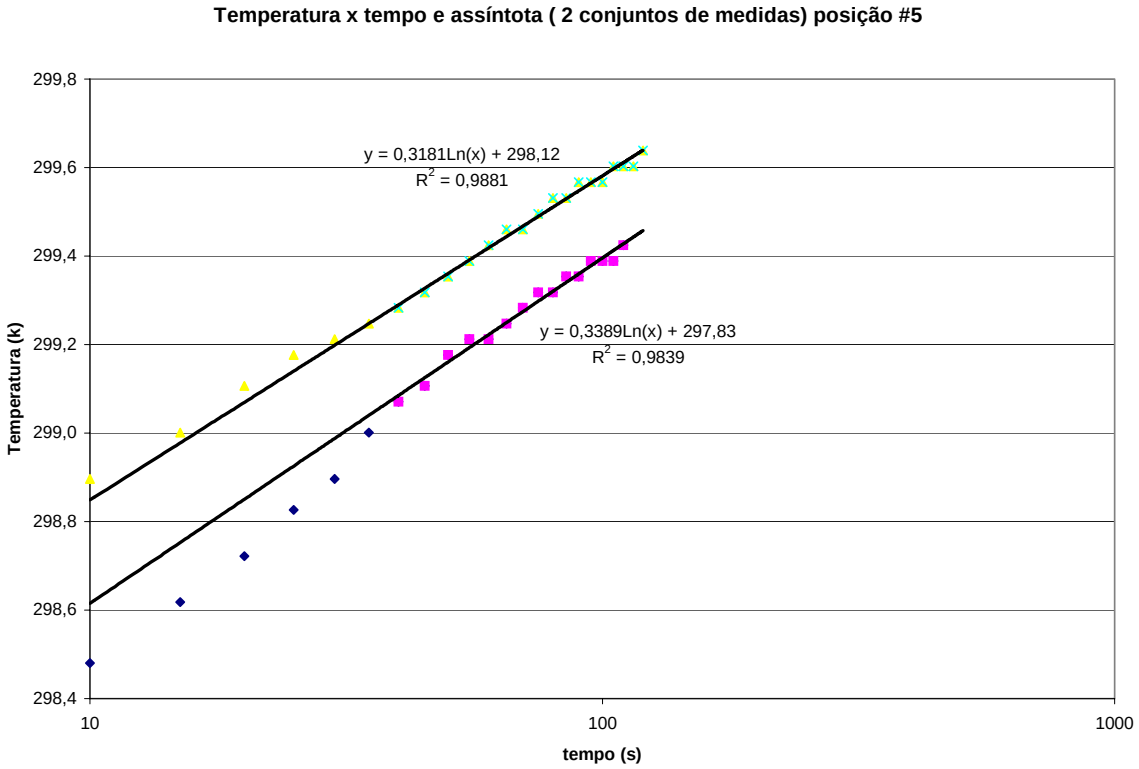


Figura 4.14 – Gráfico de temperatura (k) x t(s) obtido pelo termistor NTC na ponta de prova – 2 medidas no furo #5 e respectivas funções das assintotas

Pela equação (3.1) tem-se os valores de $\frac{q}{4\pi k}$ dados pelo coeficiente das assintotas obtidas em cada um dos furos:

posição #1:	posição #2:	posição #3:	posição#4:	posição #5:
0,56	0,44	0,39	1,10	0,32
0,86	1,46	0,30		0,34
0,52	média: 0,95	média: 0,35		média: 0,33
média: 0,65 +- 0,19				

Há grande discrepância entre os valores encontrados para $\frac{q}{4\pi k}$, tanto entre posições diferentes como entre séries de medidas em uma mesma posição. Este fato já era esperado, uma vez que há flutuações na composição do solo (quando se comparam posições diferentes) e de grau de umidade de uma medida para outra (medidas realizadas na mesma posição).

Tomando-se estes resultados e fazendo a média e a incerteza deste valor associada aos valores máximos e mínimos:

$$\frac{q}{4\pi k} = 0{,}68\ (+0{,}27;\ -0{,}35)\ \text{m.K} \qquad (4.F)$$

Os valores medidos na agulha aquecida por efeito Joule são:

$i_{\text{fio aquecedor}} = 37{,}4$ mA

$R_{\text{fio aquecedor}} = 361{,}5\ \Omega$

$P_{\text{aquecimento}} = 0{,}51$ W

Raio da sonda = $r_s = 4{,}55\ 10^{-1}$ mm

Comprimento da sonda = $L_s = 6{,}37\ 10^{1}$ mm

A potência dissipada na agulha de prova por unidade de comprimento será:

$$q = \frac{R.i^2}{L_s} = 7{,}94\ \text{W/m} \qquad (4.G)$$

juntando (4.F) e (4.G):

$$k = 0{,}92\ \text{W/m.K}\ \ (\pm \sim 50\%) \qquad (4.H)$$

4.4.2) Cálculo da Densidade da Amostra de Solo do IEE-USP

Pelos resultados obtidos em (3.A) e (3.B), pode-se calcular a densidade volumétrica do solo:

$$\rho = 1{,}73.\ 10^3\ \text{Kg/m}^3 \pm 2{,}2\% \qquad (4.I)$$

4.4.3) Calor Específico do Solo

O resultado das medidas de temperatura da sílica e do solo acondicionados no calorímetro e submetidos individualmente ao aquecimento por efeito Joule por uma resistência elétrica são mostrados na tabela 4.2. Também são mostradas as curvas construídas para cada um dos casos, suas linhas de tendência e os respectivos ΔT.

Sílica								**Solo**						
m sílica =	56,500	.+ - 0,005g						m solo =	25,76	.+ - 0,005g		Calibração do thermistor		
U =	4,95	V							U =	4,95	V		632,81*x^-0,1096	
I =	1,27	A							I =	1,27	A	(obtido nas medidas de difusividade)		
P aplicada=	6,38	W							P aplicada=	6,29	W			
1o. Conjunto de medidas				**2o. Conjunto**				**1o. Conjunto de medidas**			**2o. Conjunto**			
t(minutos)	R (Ohm)	T (K)		R(Ohm)	T(K)			R (Ohm)	T (K)		R(Ohm)	T(K)		
0,0	920	299,5		884	300,8			868,4	301,4		874,5	301,2		
0,5	919,9	299,5		883,7	300,9			867,2	301,5		872,2	301,3		
1,0	917,6	299,6		883,7	300,9			867	301,5		871,8	301,3		
1,5	916	299,7		883,8	300,9			866,9	301,5		871,6	301,3		
2,0	915	299,7		883,8	300,9			866,9	301,5		871,6	301,3		
2,5	914	299,7	ligado	883,8	300,9	ligado		867	301,5		871,8	301,3	ligado	
3,0	912,2	299,8	ligado	880,8	301,0	ligado		867,1	301,5		871,2	301,3	ligado	
3,5	904,5	300,1	ligado	867,6	301,5	ligado		866,8	301,5	ligado	867,5	301,5	ligado	
4,0	889,9	300,6		854,8	302,0			863,6	301,6	ligado	858,6	301,8		
4,5	871,9	301,3		838,2	302,6			854,9	302,0	ligado	842,9	302,4		
5,0	856,3	301,9		824,1	303,2			840,5	302,5		828,2	303,0		
5,5	844,8	302,3		812,4	303,6			821,8	303,3		814,4	303,6		
6,0	835,9	302,7		807,3	303,9			802,8	304,0		803,3	304,0		
6,5	830	302,9		802,4	304,1			786,2	304,7		794,7	304,4		
7,0	826	303,1		799,2	304,2			773,3	305,3		788,5	304,6		
7,5	823,4	303,2		796,8	304,3			763,5	305,7		783,8	304,8		
8,0	821,8	303,3		795,4	304,3			756,2	306,0		780,4	305,0		
8,5	820,8	303,3		794,5	304,4			750,9	306,3		777,9	305,1		
9,0	820,4	303,3		794	304,4			747	306,4		776,1	305,2		
9,5	820,2	303,3		793,8	304,4			744,2	306,6		774,9	305,2		
10,0	820,3	303,3		793,8	304,4			742,2	306,7		774,2	305,2		
10,5				794	304,4			740,8	306,7		773,7	305,3		
11,0				794,3	304,4			739,9	306,8		773,4	305,3		
11,5				794,6	304,4			739,3	306,8		773,4	305,3		
12,0								739	306,8		773,4	305,3		
12,5								738,9	306,8					
13,0								738,9	306,8					

Tabela 4.2 Dados de temperatura obtidos no calorímetro a partir de uma amostra padrão de Sílica e do Solo do IEE-USP para cálculo de calor específico

Fig. 4.15 **Curva de temperatura em função do tempo em um calorímetro com amostra de Sílica submetida a aquecimento por efeito Joule por 1,5 minuto**

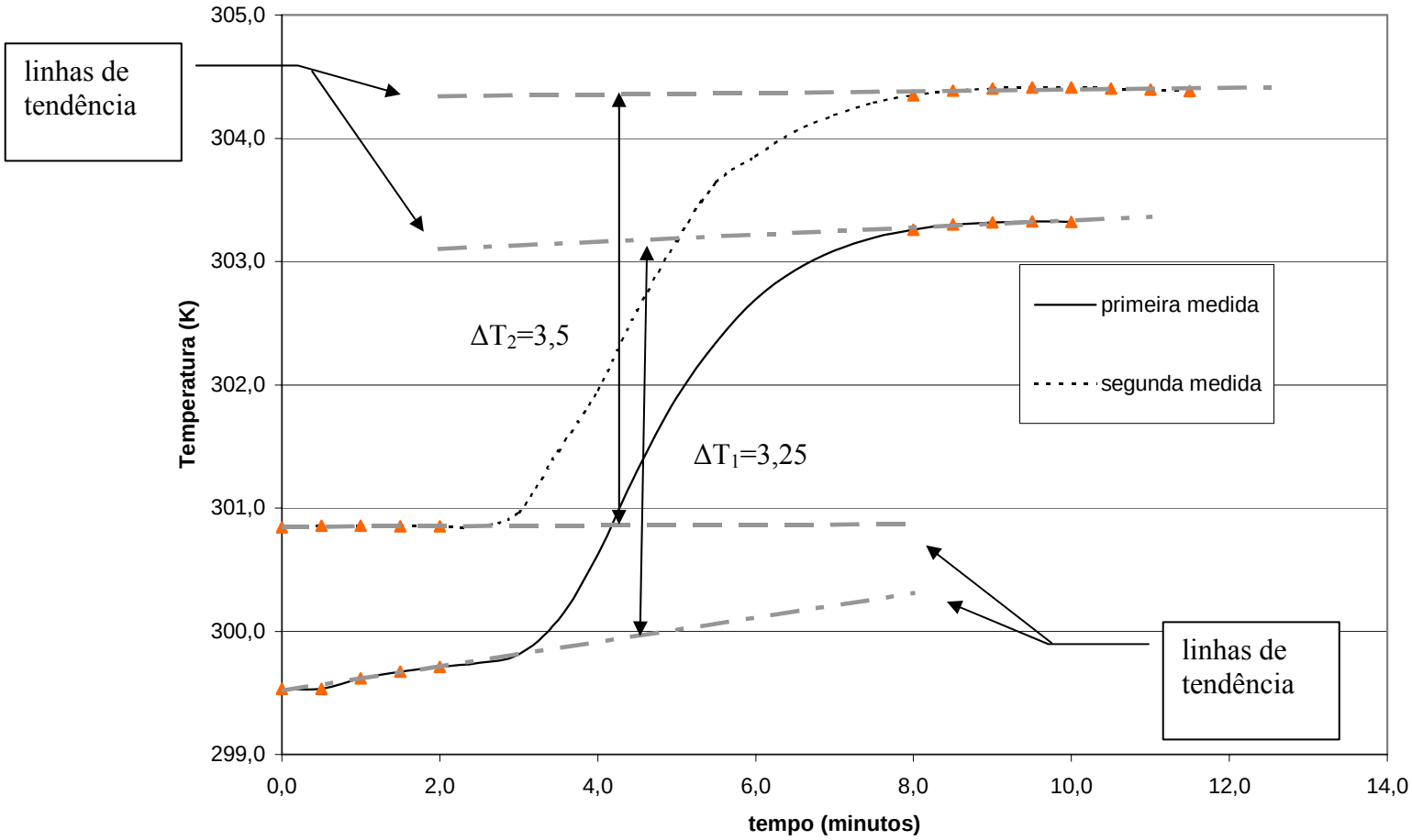
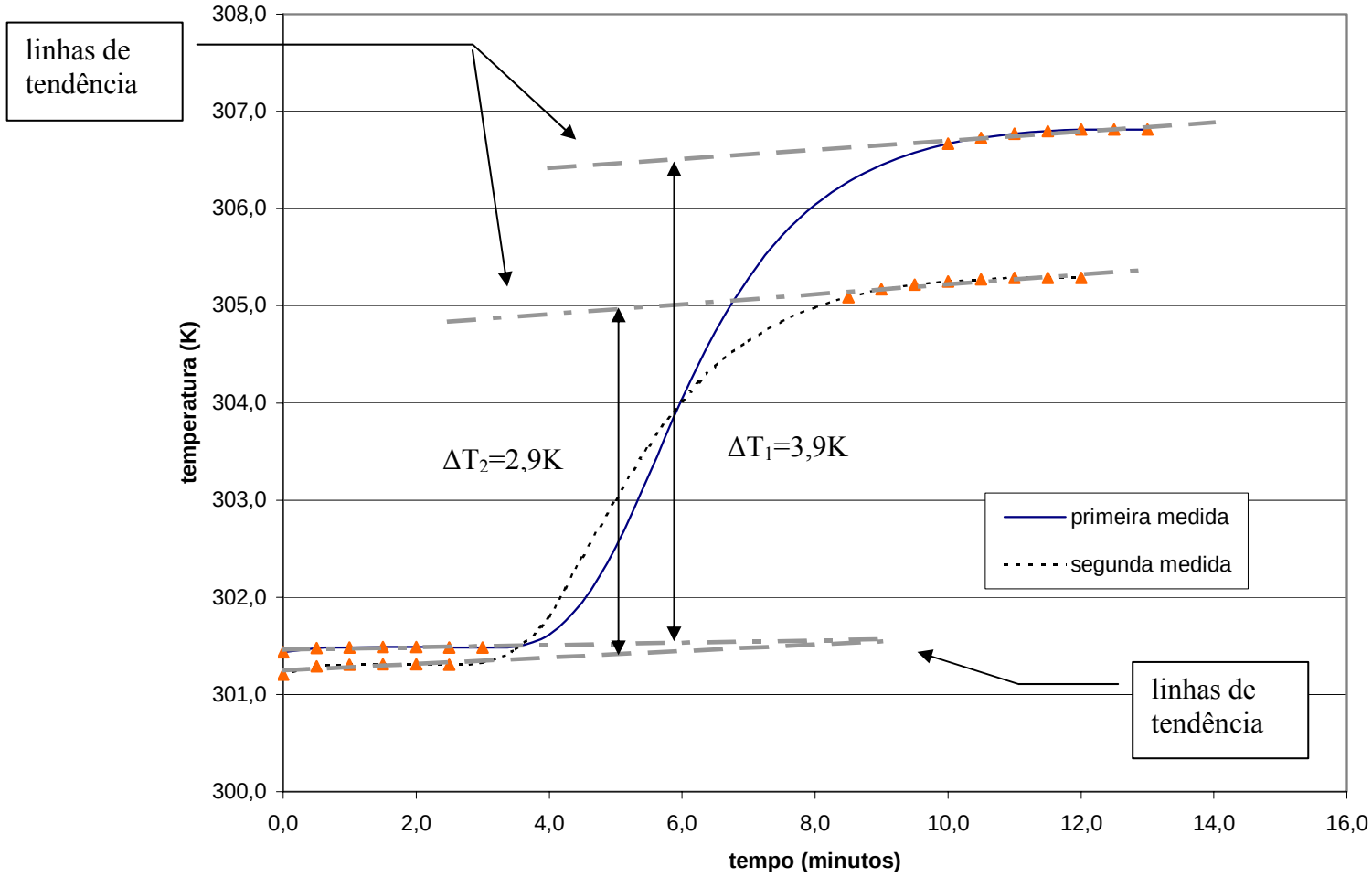


Fig. 4.16 **Curva de temperatura em função do tempo em um calorímetro com amostra de Solo submetida a aquecimento por efeito Joule por 1,5 minuto**



Com a equação (3.9), os valores obtidos na tabela 4.2 e nas figuras 4.15 e 4.16, obtém-se dois valores para calor específico da amostra de solo do IEE:

$$c_{solo\ medida\ 1} = 1.615\ J/kg.K \qquad (4.J.1)$$

$$c_{solo\ medida\ 2} = 1.636\ J/kg.K \qquad (4.J.2)$$

Apesar das duas curvas de temperatura do solo em função do tempo apresentarem uma diferença da ordem de 50%, os valores de calor específico foram bem próximos um do outro, com diferença menor que 1%.

Retomando a equação (3.2), temos como valor da difusividade térmica medida em laboratório:

$$\alpha = \frac{k}{\rho.c} = 0{,}001\ m^2/h \qquad (4.K)$$

Se a incerteza resultante é proveniente apenas das medidas de densidade e condutividade térmica, de acordo com o "Guia para Expressão da Incerteza de Medição"-(**GUI-97),** tem-se uma incerteza de aproximadamente 50% do valor obtido, proveniente principalmente do cálculo de condutividade térmica do solo.

Ainda assim, o valor obtido é compatível com os obtidos anteriormente.

Capítulo 5 Análise e discussão de resultados

5.1) Aquisição de Dados

As equações que descrevem o comportamento da temperatura do ar -equação (1.1) e o comportamento térmico do solo a uma dada profundidade -equação (1.2) são apenas representações aproximadas (modelos) do que ocorre realmente na natureza. As curvas das figuras 3.13; 4.1 e 4.2, que representam o perfil de temperatura do ar e subsolo no IEE, mostram grandes oscilações na temperatura do ambiente externo ao longo dos dia e dos meses, provenientes de efeitos locais, como cobertura de nuvens e vento e oscilações provenientes de escala global, -por exemplo as entradas de massa de origem equatorial e/ou polar-. O resultado final destas influencias é uma curva periódica diária do ar com oscilações em várias freqüências, totalmente diversa da esperada senóide lisa. Este efeito de larga escala está presente na curva de período anual, figuras 4.2a e 4.2b, evidenciado na figura 3.14, em que a periodicidade da temperatura do ar externo aparentemente desapareceu devido à não padronização do equipamento de coleta de dados segundo normas dos laboratórios meteorológicos. Como as medidas de temperatura externa foram tomadas no ponto sob a copa da árvore defronte à sala 8 do prédio dos alunos, o medidor ficou altamente susceptível às variações. Mesmo com a inadequação das medidas de $T_{ambiente}$ tomadas no IEE, elas foram utilizadas como elemento comparativo para demonstrar a diferença de comportamento oscilatório entre $T_{ambiente}$ e T_{solo}.

Usou-se então as medidas de temperatura ambiente coletadas no IAG-USP para identificação dos parâmetros da curva periódica anual, mas os dados brutos apresentaram um espectro "sujo", - com influência de oscilações de curto período-, como se pode perceber com a figura 3.15. Somente após um "tratamento" matemático com média móvel de 30 dias é que obtém-se uma curva "quase-lisa", como a da figura 4.4 -tentou-se vários intervalos para a média móvel e o de 30 dias foi o que se mostrou o mais adequado no compromisso: alisamento x manutenção das informações-. Na curva tratada ainda está presente um ruído nos vales correspondentes ao inverno em todos os anos aqui apresentados (1997;1998;1999 e 2000).

Segundo profissionais da área de meteorologia, estes ruídos recorrentes chamados "veranicos" ainda carecem de estudos para seu entendimento (**CAM-01**), mas sua existência também provoca reflexos na "onda de calor" que se propaga desde o ambiente externo até o subsolo, como pode ser observada nas medidas de temperatura do solo a 2 metros de profundidade, figura 4.5. Caso este efeito esteja sempre presente no comportamento climático de São Paulo, ele também pode servir de marcador para a tomada de tempo necessária ao cálculo da difusividade térmica. Teríamos então, além do método de atenuação de onda e do deslocamento de fase a partir de um pico (ou do vale) de onda, mais um que poderíamos denominar "veranico atrasadico".

Mesmo com uso das ferramentas matemáticas disponíveis, como o ajuste de curvas feito no Origin, a determinação exata da amplitude e da fase a partir dos dados experimentais de temperatura do solo e do ar ainda é bastante prejudicada pelas variações climáticas, sendo esta determinação a maior fonte de incerteza no cálculo da difusividade térmica pelo método de "onda de calor".

Quanto maior a série histórica disponível, melhor a precisão na determinação dos parâmetros de ajustes das curvas e melhor sua exatidão. Nosso sistema de aquisição de dados funcionou de forma adequada por aproximadamente 1 ano, com freqüentes quedas no fornecimento de energia elétrica e a conseqüente perda de dados. Ao final deste período, com a queima do ADC, o equipamento tornou-se inoperante em definitivo. Assim, a coleta de dados restringe-se apenas a este intervalo de tempo em que o equipamento fez o monitoramento dos oito sensores de temperatura.

Com o equipamento funcionando adequadamente, seria possível o acompanhamento da temperatura do subsolo em vários pontos, definindo uma área maior de estudo, além de permitir a construção de mapas de temperatura do subsolo. Possibilitaria também o estudo do comportamento das propriedades termofísicas nos eixos ortogonais, paralelos à superfície do solo.

As incertezas envolvidas nas medidas de temperatura foram relativamente altas (~0,3K), mas a não uniformidade do solo tornou praticamente desprezível esta influência na determinação de sua difusividade térmica.

Outra limitação de nosso sistema de aquisição foi o número de pontos disponíveis para medição de temperatura. Como foi projetado para estudar o comportamento térmico

dentro do prédio construído para abrigar os estudantes do PIPGE, houve disponibilidade de apenas 3 canais para tomada de dados de temperatura do solo. Para reduzir as perdas nos cabos de ligação entre transdutores e sistema operacional, os medidores foram posicionados próximos à construção, o que limitou a abrangência – em área – das medidas realizadas.

No capítulo 2, que trata das características gerais do solo, foram apresentados tabelas que relacionam tipos de solo com valores de propriedades termofísicas, tabelas 2.4. Estes valores são médias aproximadas, pois como a composição qualitativa e quantitativa de um determinado tipo de solo é muito variável e difícil de se avaliar visualmente, as tabelas geralmente são utilizadas como guias para obtenção grosseira dos valores das características termofísicas e se há demanda por avaliação mais refinada, o único meio é através das medidas *in loco*.

5.2) Resultados Obtidos

Determinado o local para a instalação do trocador de calor do sistema GSHP, é necessária a realização de medidas das propriedades termofísicas mais apuradas de modo a refinar o dimensionamento do sistema proposto, -tendo como condicionantes o custo total da obra e da eficiência pretendida no sistema GSHP a ser instalado-. Um método bastante preciso, mas de investimento alto é descrito por Shonder e Beck (**SHO-00**), que consiste em enterrar-se um tubo longo (centena de metros) acoplado a uma fonte de calor e um líquido circulante de modo que o equipamento simule um sistema GSHP. Além de fornecer os valores das propriedades térmicas do solo, este método auxilia na verificação dos outros parâmetros envolvidos no dimensionamento do sistema.

O método de "onda de calor" não simula experimentalmente o sistema GSHP, mas pode fazer uma razoável avaliação semi-empírica e sua precisão depende apenas de quão bem as variáveis termofísicas sejam medidas.

5.2.1) Medidas de Laboratório

Em função dos recursos existentes, que impedem a medida da condutividade térmica no ponto de medida da difusividade térmica (a 2 metros de profundidade), os

pontos de medida de condutividade térmica pelo Método da Ponta de Prova realizados no IEE foram escolhidos de forma a cobrir toda a área de interesse à implantação do sistema GSHP. Está claro que esta quantidade de pontos de medida da condutividade térmica do solo próximo à superfície não substitui a medida na posição de interesse, mas é o melhor que se conseguiu obter com os equipamentos disponíveis.

O aquecimento da agulha de prova em contato com o solo pode provocar alteração do contato físico metal/solo e conseqüentemente o contato térmico, devido à alteração da umidade do meio. Para verificar possíveis discrepâncias no cálculo da condutividade causadas por influência deste método, foram realizadas mais que uma medida em alguns pontos. Os resultados foram utilizados para calcular o valor médio de $\frac{q}{4\pi k}$ e, quando possível, o desvio da média. Com um valor médio para cada um dos cinco pontos de medida foi então encontrado um "valor médio" de $\frac{q}{4\pi k}$ para a área em questão. As discrepâncias entre valores encontrados nas medidas efetuadas num mesmo ponto podem ser atribuídas a estas mudanças de características físicas por influência do processo de medição. Entretanto, as diferenças observadas entre os pontos devem ter forte influência da não homogeneidade do solo e sua conseqüente variabilidade de propriedades físicas.

Os cuidados tomados nas medidas de calor específico e densidade do solo terminaram por fornecer valores com pequena margem de incerteza. Deve ser ressaltado que o cálculo de densidade do solo foi executado com o teor de umidade exatamente igual ao do momento da coleta da amostra de solo; já a medida de calor específico demandou a eliminação de umidade, pulverização dos grãos ($\Phi \leq 0{,}149mm$) e homogeneização mecânica. Assim, os resultados de medidas apresentam boa precisão, mas são pouco representativas do real valor *in situ*, uma vez que a umidade do solo é altamente variável no espaço e no tempo. A homogeneização por sua vez altera a característica inicial do solo, tornando-o, além de homogêneo, também isotrópico e com temperatura inicial uniforme, condições estas raramente encontradas na natureza (**BRI-93**).

Uma forma de se evitar todos o procedimentos de retirada de amostra do solo e alteração de seu teor de umidade é a utilização do método de dupla agulha, uma das quais equipada com uma resistência de aquecimento e outra com um termopar, como descrito por

Campbell et al. (**CAM-91**). Tomando-se alguns cuidados experimentais, é possível a determinação do calor específico e da capacidade térmica com boa precisão (**KLU-93**). Ainda assim, com a utilização do método de agulha única, foi possível minimizar as incertezas envolvidas nas medidas realizadas em laboratório, de forma a garantir que as variações locais das propriedades termofísicas do solo sempre sejam muito maiores que as incertezas provenientes das medidas de laboratório.

O valor obtido de condutividade térmica do solo (k=0,92 W/K.m) classifica-o entre os denominados *Heavy Soil Dry; Heavy Soil Damp* e *Light Soil Damp*. A proporção de água em sua composição deve ser o principal fator a deixá-lo mais próximo de um ou outro destes tipos.

5.2.2) Medidas de difusividade térmica

Os valores de difusividade térmica obtidos pelos dois primeiros métodos, o de atenuação e o de deslocamento de fase a partir do estudo comparativo da evolução da temperatura do ar e do solo estão em ótima concordância entre si. Ambos os métodos são chamados de "Harmonic Equation" por Horton et al. e considerados como os métodos de avaliação de difusividade mais recomendados dos seis métodos estudados por ele (**HOR-83**). O terceiro método aqui tratado, chamado de "Agulha de Prova", apesar de partir de conceitos diversos, envolver medidas com solo úmido e (o mesmo) solo seco e pulverizado, também forneceu valor semelhante aos anteriores, de onde se conclui que, ao menos no local e nas condições em que se deram as medidas, os métodos convergem para um mesmo valor, indicando que o valor de difusividade térmica médio do solo nesta área deve ser o obtido nos resultados 4.A; 4.B e 4.K. Se os valores de temperatura do solo e do ar são disponíveis, os métodos de atenuação e deslocamento de fase certamente são os mais simples para obtenção de difusividade térmica.

A obtenção da condutividade térmica pode ser feita a partir da utilização de um dos muitos métodos descritos para este fim, muito embora todos se refiram a medidas a pequena profundidade (até poucas dezenas de centímetros). Até o momento, não se tem relato na literatura um arranjo experimental que, de forma simples e prática, seja capaz de determinar a condutividade na profundidade de instalação do sistema GSHP. A

determinação da capacidade térmica de um corpo pode ser obtida alternativamente por intermédio da relação 3.2: $\alpha = \frac{k}{\rho.c}$, onde ρ.c =C = capacidade térmica, desde que se conheça o valor de α.

O calor específico do solo pode ser determinado pelo método do calorímetro e a densidade por gravimetria, como utilizado aqui. A capacidade térmica pode ser obtida através de medidas diretamente no solo, como em Kluitemberg et al. (**KLU-93)**.

Apesar da simplicidade do arranjo experimental do método "*Harmonic Equation*" aqui utilizado, em que o valor médio local da difusividade aparece naturalmente, há o inconveniente de se fazer um furo profundo, em torno dos 2 metros sob a superfície, de modo a posicionar o termômetro na profundidade padrão de instalação de sistemas GSHP horizontais. O uso do método descrito por Kluitemberg, que consta de uma agulha aquecedora paralela ao outra com um termopar para obtenção da capacidade térmica com alta precisão, pode ser o melhor caminho para avaliação da condutividade térmica, mas é necessário alguma adaptação no equipamento para que se consiga levantar este valor na mesma profundidade de medida da difusividade.

5.3) Dimensionamento do sistema de troca térmica imerso no solo a partir do valor de difusividade térmica obtido experimentalmente

Com os valores das propriedades termofísicas obtidos experimentalmente e algumas suposição de valores típicos para parâmetros dos sistemas GSHP-horizontais, é possível uma avaliação das dimensões adequadas do equipamento localizado no solo e dos efeitos térmicos que causa no meio.

Tomando o valor obtido de difusividade térmica experimental e os valores arbitrariamente escolhidos de:

potência total depositada no solo = 1000 Watts

comprimento do tubo de polietileno 100 metros

Φ_{tubo} = 0,0189 m

D = profundidade = 2 m

T = 1 mês = 720 horas

Tem-se, pela a equação (2.9b):

$$\left(T - T_0\right) = \frac{1000}{2.\pi.100.0{,}001.1726.1637}\left[I\left(\frac{0{,}0189}{2.\sqrt{0{,}001.720}}\right) - I\left(\frac{2.2}{2.\sqrt{0{,}001.720}}\right)\right] = 1{,}73.\left(I\left(0{,}011\right) - I\left(2{,}36\right)\right)$$

$$\left(T - T_0\right) = 13 \text{ K} \qquad (5.A)$$

ou alternativamente, fixando $\left(T - T_0\right) = 6$ K

O tubo de Φ_{tubo} = 0,0189 m enterrado a 2 metros de profundidade deverá ter um comprimento de:

L = 203 metros (5.B)

Estes resultados são valores padrão de sistemas GSHP encontrados na literatura.

5.4) Construção de funções de correlação entre α e C

A utilização direta da difusividade térmica na equação (3.1b) requer o conhecimento do comportamento da capacidade térmica em função da difusividade. A parametrização da capacidade térmica do solo (com pequena proporção de matéria orgânica) em função da fração volumétrica do solo, fração volumétrica de água e fração volumétrica de ar que preenche as porosidades do solo pode ser encontrada em Ochsner et al. (**OCH-01**) e é dada por:

$$C = \rho_s.v_s.c_s + \rho_w.c_w.\theta \qquad (5.1)$$

onde:

ρ_s =densidade da parte sólida do solo

v_s = fração volumétrica de sólido

c_s = calor específico da parte sólida

ρ_w = densidade da parte líquida (água)

c_w = calor específico da água

θ = fração volumétrica de água

Se fosse possível uma parametrização unívoca da difusividade térmica em função destes parâmetros fundamentais, bastaria apenas correlacioná-las para determinar a dependência da condutividade com a difusividade térmica o que, pela figura 2.4, obviamente não é o caso. A partir do conjunto de dados apresentados na figura 2.4, pode-se fazer uma tentativa de correlação entre estes pontos para obtenção dos parâmetros. Alguns comportamentos estão claramente definidos como lineares, como o caso dos gráficos (λ x v_s); (λ x n_a); (C x θ); (C x n_a); (α x v_s) e (α x n_a). Os restantes estão espalhados de forma não muito definida, caso dos gráficos (λ x θ); (C x v_s) e (α x θ).

Observação: o autor substitui k por λ para representar a condutividade térmica.

Por suposição, o comportamento é linear em todas as funções em relação a seus parâmetros fundamentais e assim, tem-se as retas aproximadas:

$$C = (1 + 4\theta).10^6 \qquad (5.2a)$$

$$C = (1 + 6v_s).10^6 \qquad (5.2b)$$

$$C = (3 - 2.n_a).10^6 \qquad (5.2c)$$

$$\alpha = \theta.10^{-6} \qquad (5.3a)$$

$$\alpha = 2.v_s.10^{-6} \qquad (5.3b)$$

$$\alpha = (1 - n_a).10^{-6} \qquad (5.3c)$$

Estudando caso a caso a influência das variáveis fundamentais sobre as grandezas C e α:

5.4a)Em θ (fração de água)

A influência de uma variação da fração volumétrica de água (θ) sobre a função difusividade térmica, equação (5.3a), combinada com o comportamento da condutividade térmica em função variação da fração volumétrica da água fornece:

$$C = \left(1 + 4.\alpha.10^6\right)10^6 \tag{5.4}$$

e o produto C.α:

$$C.\alpha = \left(1 + 4.\alpha.10^6\right)10^6.\alpha \tag{5.5}$$

Voltando à equação de dimensionamento do sistema de troca térmica com o solo, equação (2.9b),

$$\left(T - T_0\right) = \frac{\dot{q}.I(X)}{2.\pi.k.L} = \frac{\dot{q}.I(X)}{2.\pi.\alpha.C.L} \tag{2.9b}$$

associada com as equações (2.12) e (5.4), obtém-se a função de T x α relacionada apenas ao parâmetro fundamental θ:

$$\left(T - T_0\right)_\theta = \frac{Q'.\left[\ln\left(\frac{1}{X}\right) + \frac{X^2}{2} - \frac{X^4}{8} - 0{,}2886\right]_{r,2D}}{2.\pi.\left(1 + 4.\alpha.10^6\right)10^6.\alpha}$$

$$\left(T - T_0\right)_\theta = \frac{Q'.\left(\ln\left(\frac{2.\sqrt{\alpha.t}}{r}\right) - \ln\left(\frac{2.\sqrt{\alpha.t}}{2D}\right) + \frac{r^2 - 4D^4}{8.\alpha.t} - \frac{r^4 - 16.D^4}{128.\alpha^2.t^2}\right)}{2.\pi.\left(1 + 4.\alpha.10^6\right)10^6.\alpha} \tag{5.6a}$$

ou:

$$\left(T - T_0\right)_\theta = \frac{Q'.\left[\ln\left(\frac{2D}{r}\right) + \frac{r^2 - 4D^2}{8.\alpha..t} - \frac{r^4 - 16.D^4}{128.\alpha^2.t^2}\right]}{2.\pi.\left(1 + 4.\alpha.10^6\right)10^6.\alpha} \tag{5.6b}$$

cujo comportamento é mostrado na figura 2.6. A aproximação de comportamento linear nos pontos tão dispersos como observado na figura 2.4, (α x θ), provoca uma grande incerteza na definição do valor de condutividade na equação (5.5). Assim, a avaliação na variação do valor de $(T - T_0)_\theta$ com a variação do valor de difusividade térmica do solo fica comprometida com a (im)precisão na determinação de α.

O valor da condutividade térmica obtida experimentalmente é:

$k_{experimental}$ = 0,92 W/m.K -apresentado no capítulo 4, resultado (4.H),

fornece o resultado (5.A); $(T - T_0)_\theta$ =13K

O valor obtido pela parametrização aproximada das equações 5.2a e 5.3a e calculado na equação 5.5 é:

$k_{aprox.} = C.\alpha$ = 0,58 W/m.K, 5.C

e na equação (5.6b): $(T - T_0)_\theta$ =17K 5.D

Com diferença de mais de mais de 30% entre o valor obtido experimentalmente e o valor obtido através de parametrização dos pontos do gráfico, situação esta que dificulta muito a discussão a respeito de quanto uma variação na difusividade implicaria na variação de ΔT_θ.

A figura 5.1 apresenta o aspecto geral do comportamento de ΔT em função da difusividade, tendo como parâmetro fundamental a fração volumétrica de água no solo. O ponto observado na curva representa o valor medido experimentalmente (α = 0,001 m^2/h) e o correspondente valor de ΔT (= 17K).

A diferença observada na condutividade térmica medida experimentalmente com a calculada a partir das equações (5.2) e (5.3) é proveniente da dispersão dos pontos provocada pela grande variabilidade de solo pesquisado (4 grandes grupos, conforme a figura 2.4). Uma pequena variação na proporção dos componentes do solo, quartzo, por exemplo, pode alterar significativamente suas propriedades térmicas.

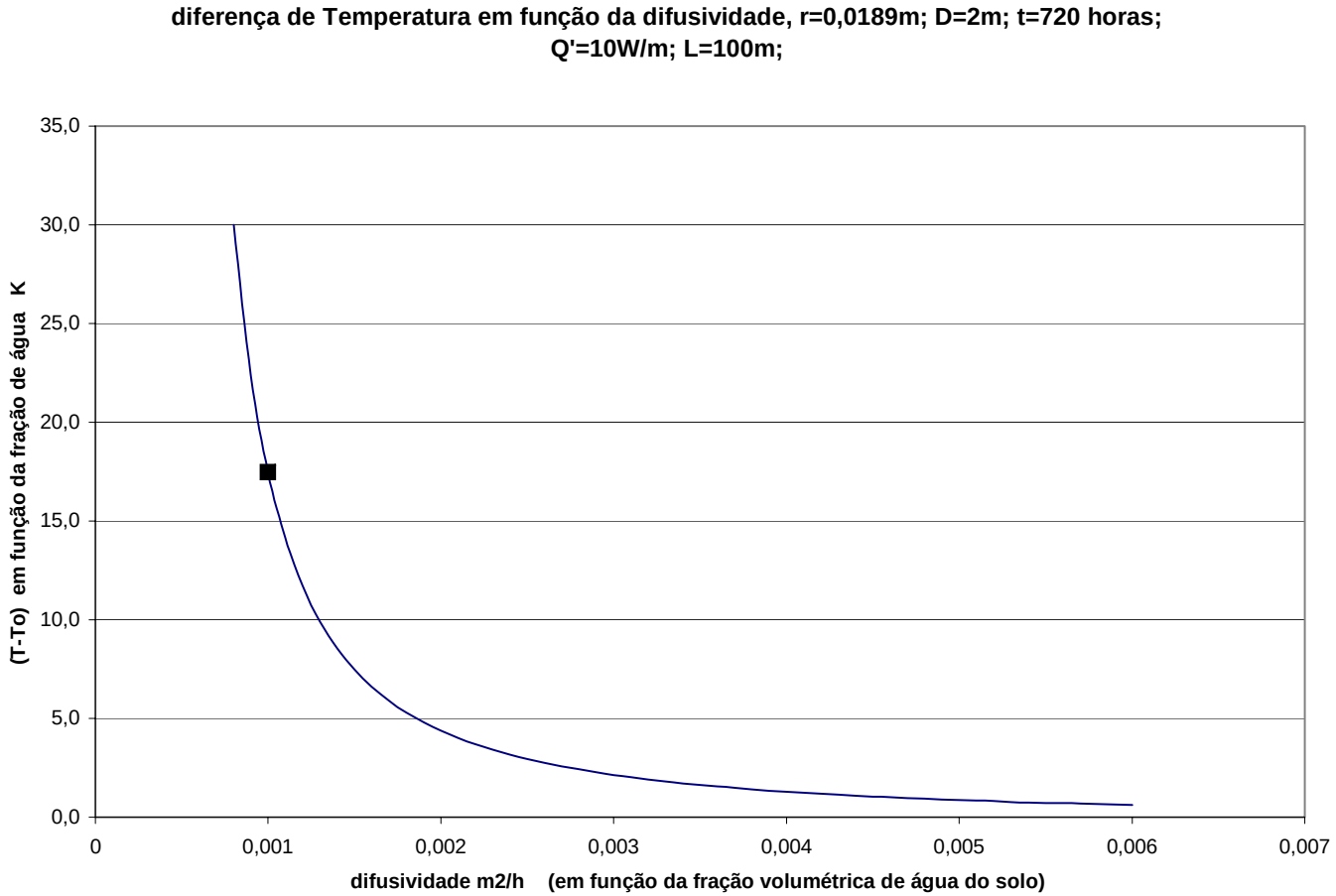


Figura 5.1 Comportamento de $(T-T_0)_\theta$ em função da difusividade térmica, onde θ é a fração de água do solo

5.4b) em v_s (fração sólida) Estudo semelhante é executado para $(T - T_0)_{v_s}$ x α ou seja, a diferença de temperatura em função da difusividade tendo como parâmetro fundamental a fração volumétrica sólida da composição do solo.

Das equações (5.2b) e (5.3b), temos:

$$C = \left(1 + 3.\alpha.10^6\right)10^6 \tag{5.7}$$

e:

$$(T - T_0)_{v_s} = \frac{Q'.\left[\ln\left(\frac{2D}{r}\right) + \frac{r^2 - 4D^2}{8.\alpha..t} - \frac{r^4 - 16.D^4}{128.\alpha^2.t^2}\right]}{2.\pi.\left(1 + 3.\alpha.10^6\right)10^6.\alpha} \tag{5.8}$$

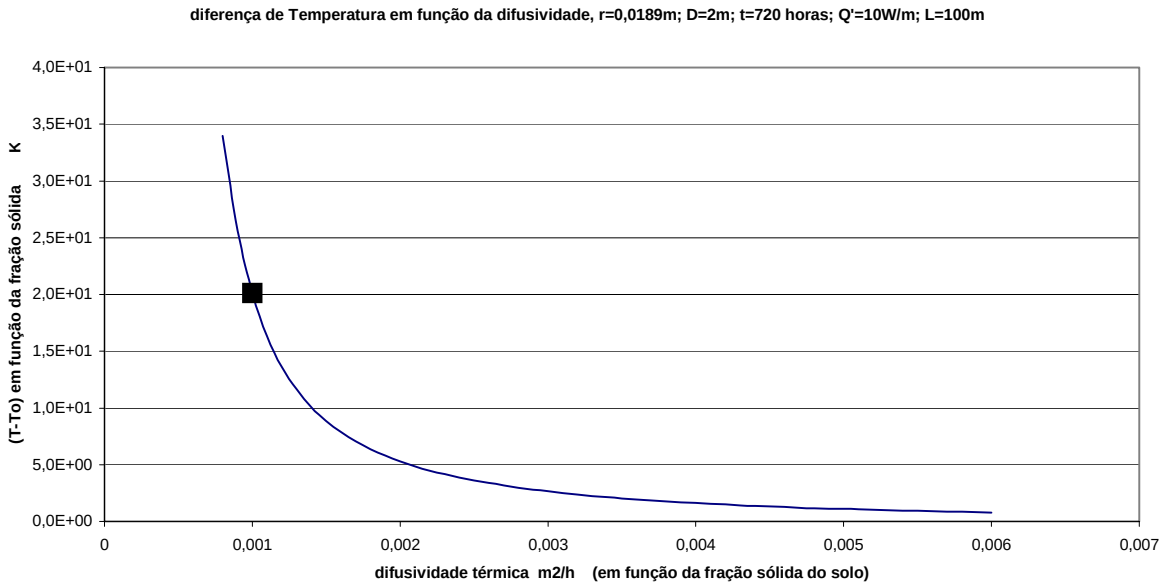


Figura 5.2 Comportamento de $(T\text{-}T_0)_{vs}$ em função da difusividade térmica, onde v_s é a fração volumétrica de sólido no solo

O ponto observado corresponde a α = 0,001 m2/h e $(T\text{-}T_0)$ = 20 K. A condutividade térmica obtida pelo modelo tem o valor: k_{vs} = 0,51 W/m.K (fração volumétrica de sólido)

5.4c)Em função de n_a (fração de ar)

A diferença de temperatura em função da difusividade tendo como parâmetro fundamental a fração volumétrica de ar na composição do solo $(T - T_0)_{n_a}$ x α fornece:

$$C = \left(1 + 2.\alpha.10^6\right)10^6 \tag{5.9}$$

e:

$$\left(T - T_0\right)_{n_a} = \frac{Q'.\left[\ln\left(\frac{2D}{r}\right) + \frac{r^2 - 4D^2}{8.\alpha.t} - \frac{r^4 - 16.D^4}{128.\alpha^2.t^2}\right]}{2.\pi.\left(1 + 2.\alpha.10^6\right)10^6.\alpha} \tag{5.10}$$

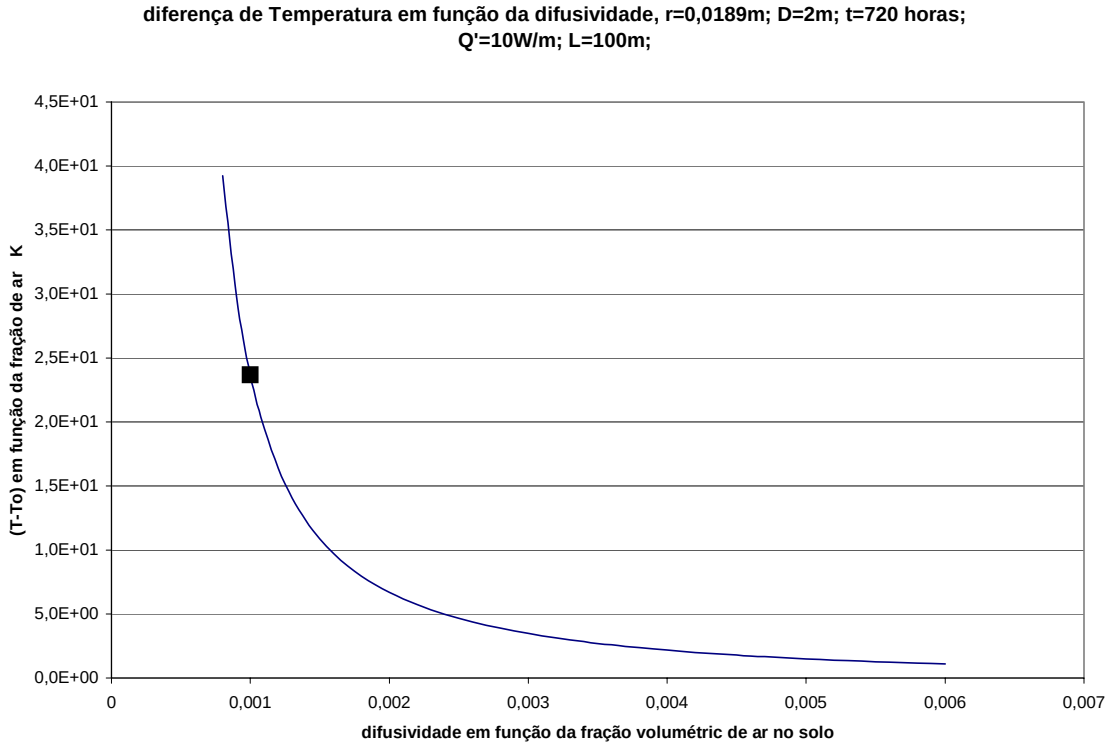


Figura 5.3 Comportamento de $(T\text{-}T_0)_{na}$ em função da difusividade térmica, onde n_a é a fração volumétrica de ar no solo

O ponto observado corresponde a α = 0,001 m2/h e $(T\text{-}T_0)$ = 24 K. A condutividade térmica obtida pelo modelo tem o valor: k_{vs} = 0,43 W/m.K (fração volumétrica de ar no solo)

5.4d) Combinação de todos os fatores

A condutividade térmica obtida a partir do modelo proposto nas equações (5.2) e (5.3) deve ser uma combinação linear das condutividades térmicas devido à participação das componentes líquida; sólida e ar:

$$C = A_1.C_\theta + A_2.C_{v_s} + A_3.C_{n_a} \tag{5.11}$$

Entretanto, com as informações disponíveis é impossível a identificação destes parâmetros.

Pelos gráficos apresentados nas figuras 5.1; 5.2 e 5.3 pode-se avaliar apenas a ordem de grandeza da diferença ($T-T_0$) em função da difusividade térmica.

Um levantamento mais detalhado, controlando-se a composição das frações integrantes do solo (principalmente a fração sólida, que é mais variável), deve proporcionar um estudo mais refinado e uma determinação mais apurada de suas propriedades termofísicas em função de suas variáveis fundamentais θ; v_s e n_a. Ainda assim, a alta variabilidade da composição do solo impede uma determinação segura de suas propriedades termofísicas e, por isto, é verificado em toda a literatura de GSHP que a avaliação precisa do potencial de troca térmica do solo só é possível com medidas no local e na profundidade em que se pretende implantar o sistema.

Desta forma, se houver necessidade de mapeamento do comportamento térmico do solo e obtenção das propriedades termofísicas em uma área grande, uma solução interessante é a associação com outras áreas de conhecimento interessadas na mesma região (por exemplo, trabalho conjunto com geofísicos e/ou geólogos) fazendo uma combinação de arranjos experimentais que possibilitem atender às necessidades dos grupos de pesquisa envolvidos. Apenas com inserção de um termômetro digital associado a um *datalogger* este método pode ser estendido a outros sítios e o comportamento térmico e a difusividade térmica do solo podem ser obtidos como subproduto de outras pesquisas.

5.5) Potencial de Condicionamento

Na seção 3.2 –Curva de Temperatura do ar fornecida pelo IAG-, a figura 3.14 mostra uma senóide teórica construída com os parâmetros característicos das condições

ambientais em São Paulo. A construção de uma senóide teórica com os parâmetros característicos do solo do IEE permite apresentar as duas curvas juntamente com a faixa de conforto térmico previsto para São Paulo (figura 5.4). A tabela 5.1 apresenta a região de conforto e as ações necessárias nas outras regiões para o retorno ao conforto. A comparação entre as duas curvas e a zona de conforto térmica pode dar uma idéia do potencial disponível no solo para condicionamento de ambiente construído (figura 5.5):

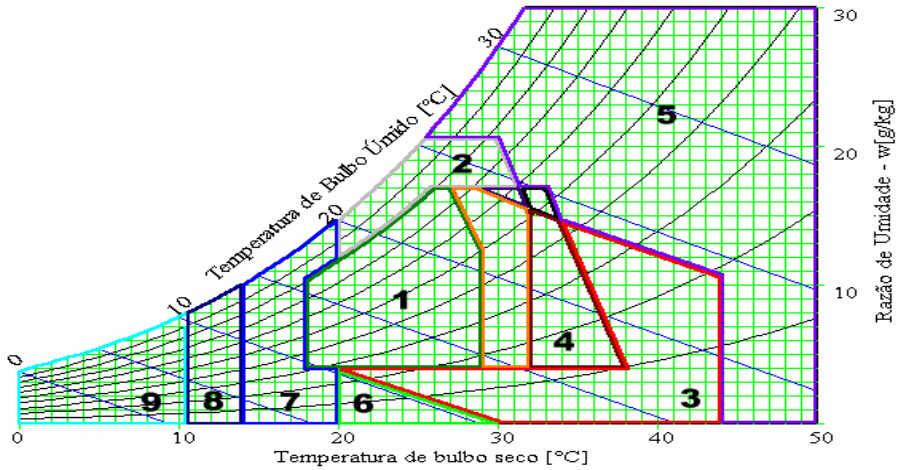


Figura 5.4 Carta Bioclimática adotada em S. Paulo, construída sobre o diagrama psicrométrico (**Bar-97)**

Código		Descrição
1		Zona de Conforto
2		Zona de Ventilação
3		Zona de Resfriamento Evaporativo
4		Zona de Massa Térmica para Resfriamento
5		Zona de Ar Condicionado
6		Zona de Umidificação
7		Zona de Massa Térmica e Aquecimento Solar Passivo
8		Zona de Aquecimento Solar Passivo
9		Zona de Aquecimento Artificial

Tabela 5.1 – Formas de controle climático sobre a carta bioclimática

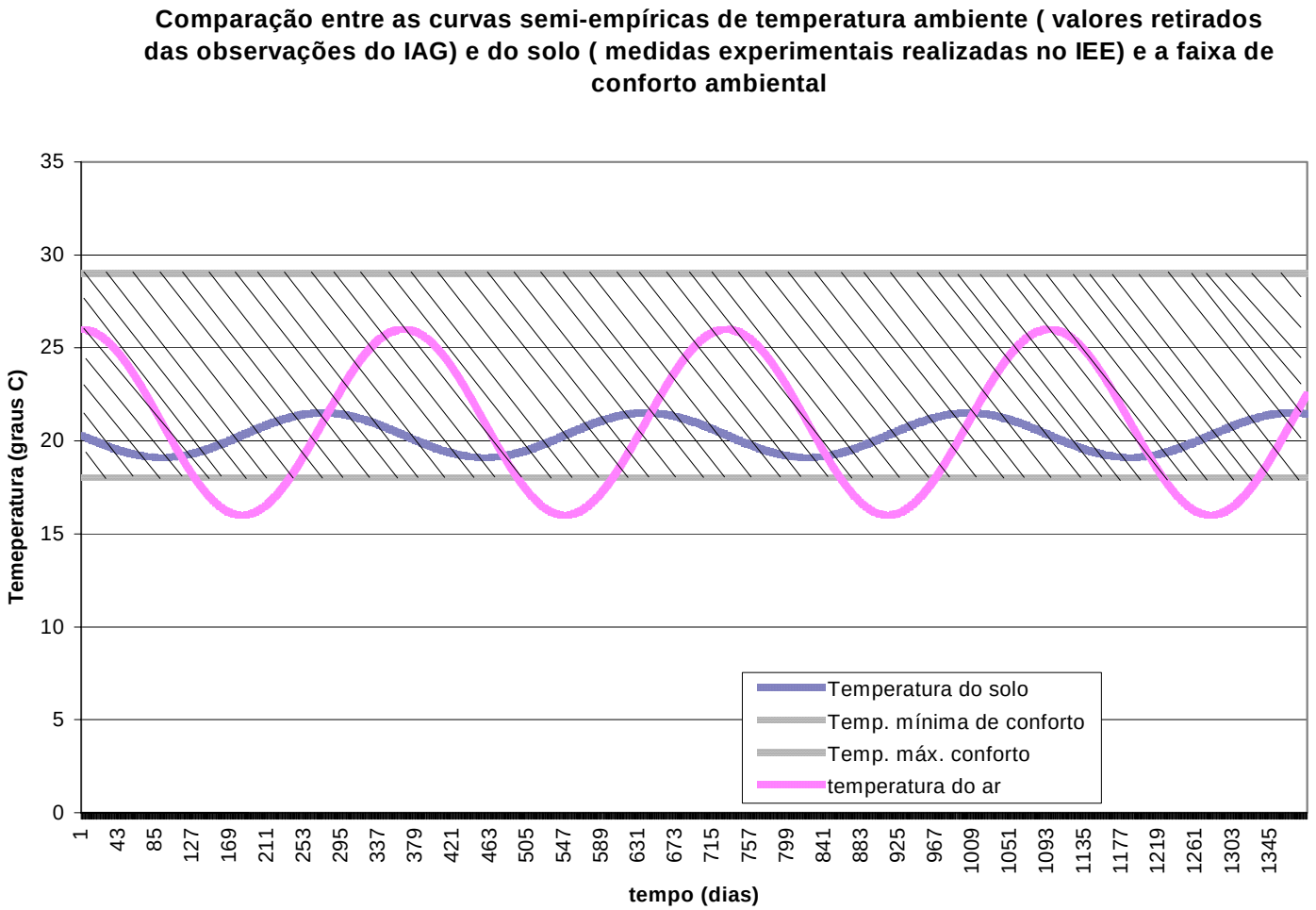


Figura 5.5 Região de conforto térmico (termômetro de bulbo seco) envolvendo as curvas de temperatura do ar e do solo a 2 metros de profundidade - dia 1 = pico de verão

A curva representativa da temperatura ambiente foi construída a partir de parâmetros médios calculados com os dados experimentais fornecidos pelo IAG, o que eliminou os picos de temperatura que normalmente são observados no verão – chegando com freqüência (dentro da sala) próximo aos 35^0C-. Eliminou também os picos de mínima temperatura que ocorrem durante o inverno, por vezes chegando a 5^0 ou 6^0 C. Já a curva que representa a temperatura do solo é mais próxima do que realmente ocorre, pois o solo atua como um *buffer* que despreza as oscilações de "alta" freqüência – figura 5.5-.

Pela figura, a curva representativa da temperatura ambiente situa-se quase que totalmente dentro da região de conforto definida pelo termômetro de bulbo seco (de 19^0C a 29^0C). Considerando apenas esta curva, não haveria necessidade de condicionamento de ambiente com sistema de refrigeração, apenas uma pequena faixa de tempo apresenta necessidade de aquecimento.

A realidade é que há uma demanda por refrigeração nos dias quentes de verão (que não é mostrado na figura 5.5, mas pode ser observado no conjunto de figuras 4.1) em que ocorrem os máximos de temperatura e outra de aquecimento nos mínimos de temperatura no inverno. A quase estabilidade térmica observada no solo a 2 metros de profundidade – situando-o dentro da região de conforto térmico-, indica que a conexão por meio de um sistema GSHP, entre o ambiente construído e o solo, pode passar esta estabilidade térmica para dentro da construção. O quão próximo este comportamento térmico dentro do prédio vai ficar do comportamento térmico do solo depende fundamentalmente do dimensionamento e qualidade do sistema GSHP montado para fazer a troca térmica entre os dois.

O dimensionamento e eficiência da bomba térmica utilizada; dimensionamento e eficiência do sistema de troca térmica dentro do prédio; eficiência de troca térmica do líquido utilizado no circuito fechado "bomba de calor-trocador térmico no solo"; eficiência da interface bomba de calor-trocador térmico no solo; eficiência de troca térmica do tubo de polietileno enterrado no solo e seu correto dimensionamento são elementos fundamentais para definir a capacidade de troca térmica global do sistema GSHP.

O conhecimento da carga térmica a ser rejeitada (ou admitida) juntamente com dimensionamento e eficiência do sistema GSHP permite avaliar numericamente o potencial de condicionamento do conjunto "ambiente construído + sistema GSHP".

5.6) Caminhos para Avaliação de Potencial de Troca Térmica com o Solo

Os problemas enfrentados, as soluções encontradas e os resultados obtidos permitem elaborar um conjunto de proposições para investigação de potencial de troca térmica disponível no solo.

a) o método de "onda de calor" permite avaliação adequada da difusividade térmica do solo, sem a necessidade de instalação de dois sensores de temperatura a profundidades diferentes. Apenas um sensor de temperatura no solo na profundidade adequada e um de temperatura ambiente –desde que este esteja dentro dos padrões de medidas meteorológicas- são suficientes.

b) As amostras de solo levadas a laboratório para medida da densidade, condutividade térmica e calor específico mostraram-se também adequadas, apesar da amostra passar pelo tratamento de secagem para eliminação de umidade e tratamento mecânico para uniformização. A eliminação da umidade provocou alterações na condutividade, calor específico e densidade em proporções cujo efeito foi o cancelamento mútuo deste efeito no numerador e denominador. Para evitar possíveis problemas com o não cancelamento do efeito, sugere-se o desenvolvimento de um novo método, com a disposição de um termômetro e um circuito aquecedor a uma distância adequada um do outro, todos na mesma profundidade de solo, e assim proceder-se o calculo da condutividade térmica e calor específico do solo sem retirada e tratamento de amostra.

c) Avaliação do impacto provocado no solo pela estocagem ou depósito de energia térmica através da equação de dimensionamento no solo de sistema GSHP.

d) Utilização dos resultados obtidos no item **c** para dimensionamento do sistema de troca térmica completo, incluindo todos os dispositivos externos ao solo.

CAPÍTULO 6 Conclusões e Propostas de Continuação do trabalho

6.1) Conclusões

A montagem do sistema de aquisição de dados de temperatura no Prédio dos alunos do PIPGE e os resultados ali originados possibilitaram o estudo de algumas questões relacionadas ao condicionamento do ambiente, entre as quais o estudo aqui apresentado.

Fez-se uma simulação em computador de um sistema de troca térmica com o solo que funcionasse de forma "quase passiva", ou seja, sem a utilização de bomba de calor. O sistema faria troca térmica com o solo e prédio de forma natural e, para aumentar sua eficiência dentro do prédio, previu-se ventilação forçada sobre o trocador de calor. Este sistema, apesar de possível, mostrou-se inviável economicamente, dada a grande área de troca térmica necessária no solo e dentro do prédio.

A medida das propriedades termofísicas do solo é fundamental ao dimensionamento de sistemas de bombas de calor acopladas ao solo e são elas que definem as dimensões do equipamento disposto no solo. Este estudo mostra quais são os parâmetros importantes que devem ser levados em conta e sugere métodos mais convenientes para sua medida.

Não se tem muito claro qual seria o impacto, no Brasil, da implantação de sistemas de GSHP, uma vez que a demanda por sistemas de condicionamento de ambiente. Pelas características do sistema GSHP, nos locais onde a utilização de sistemas de refrigeração (ou aquecimento) é indispensável, certamente há economia de energia elétrica. Como as condições ambientais e sociais brasileiras (solo, clima, hábitos de usuários, etc) são completamente diferentes das encontradas nos EUA, a suposição de economia de 30% (ou mais) de energia elétrica pode não ser verdade e por isto a quantidade de energia conservada depende de avaliação pós-instalação do sistema.

O funcionamento adequado dos sistemas GSHP, por sua vez, depende de quão apuradas são as definições de seus parâmetros dimensionais, que dependem da avaliação o mais precisa possível das propriedades termofísicas do solo, em especial de sua difusividade térmica.

Para este fm, o sistema de medidas de temperatura para acompanhamento do comportamento térmico do solo ao longo do ano mostrou-se simples e adequado, podendo

servir de padrão a ser utilizado em outros locais para mapeamento do solo em regiões maiores. O consórcio com outras áreas de conhecimento para estudo das propriedades físicas do solo pode ser um fator de barateamento de pesquisas e ampliação dos conhecimentos sobre o solo.

Os resultados da medida da difusividade pelos métodos de atenuação de fase; deslocamento de fase e o refinamento do deslocamento de fase, com ajuste de curva apresentaram uma excelente concordância entre si, o mesmo ocorrendo com as medidas realizadas nos laboratórios do IAG-USP.

Apesar do resultado obtido pelo atraso na onda de calor no solo ser da mesma ordem de grandeza do resultado pela atenuação, observou-se que a complexidade das variáveis atmosféricas dificulta o ajuste senoidal (caso do ajuste senoidal de T_{solo}, com "chi quadrado" muito baixo). As principais influências observadas ocorrem em uma oscilação com período aproximadamente cinco vezes menor que o período anual e com um "ruído" de temperatura no inverno (vide figuras 4.4; 4.5 e 4.6), indicando "veranicos" periódicos, fenômeno este aparentemente ainda não estudado.

A complementação das medidas das propriedades termofísicas do solo pelo método de "onda de calor" com as medidas realizadas nos laboratórios do IAG também mostrou boa concordância com os resultados de campo, mesmo com a eliminação da umidade da amostra de solo para medida de sua capacidade térmica.

Os modelos que prevêem as características do solo e determinam suas propriedades termofísicas podem apresentar erros de avaliação tão grandes que terminam por inviabilizar o dimensionamento de sistemas GSHP, reforçando a necessidade de medidas in situ destas propriedades

Todos os métodos encontrados de medidas das propriedades termofísicas são para aplicação próximos à superfície do solo, 20, 30 cm no máximo. Métodos como o de duas agulhas de comprimento 28 mm, uma com aquecedor e outra com sensor de temperatura, ambas enterradas nos solo a uma distancia de 6 mm uma da outra, proposto por Bristow et al. (**BRI-94)** podem ser adaptados e utilizados para medida de campo da capacidade térmica do solo. Abu-Hamdeh (**ABU-00**) utilizou o método de agulha única de comprimento 170mm para determinar a condutividade térmica do solo, o que ainda

apresenta resultados de capacidade térmica na superfície do solo, não atingindo a profundidade de interesse.

Estudo sistemático a partir da metodologia proposta por Ochsner et al.(**OCH-01**), em que as propriedades termofísicas sejam estudadas a partir das frações sólida, líquida e gás dos componentes do solo, mas com a composição sólida rigidamente controlada (proporção em que os minerais entram em sua composição) pode mostrar uma correlação mais “forte”que a observada aqui.

Parikh et al. (**PAR-79**) verificaram um aumento do valor de difusividade de um solo sit loam de 0,0022 cm^2/s em solo seco a 0,0042 cm^2/s a 30% de umidade (em volume). Acima deste valor de umidade a difusividade permaneceu constante. Apesar da grande dependência da difusividade térmica com a umidade, a eliminação da umidade de nossa amostra de solo para a medida em laboratório estranhamente não provocou diferença significativa no resultado de difusividade.

Como o regime de umidade ao longo do ano influi diretamente no valor de difusividade térmica e sua variação ser maior na superfície que a 2 metros de profundidade, o comportamento da umidade também deve ser estudado como forma de prever as oscilações anuais com o regime de chuvas.

O acompanhamento de temperatura em período maior poderá dizer se a difusividade e condutividade térmicas são afetadas (e em que intensidade) pelo período de chuvas a esta profundidade de 2 metros.

Mostrou-se que a difusividade térmica média de um dado sítio pode ser obtida de maneira fácil e com boa precisão. O desenvolvimento de um método com a mesma característica que permita obter a condutividade ou a capacidade térmica possibilitaria a determinação das três propriedades termofísicas fundamentais.

No cálculo do calor específico, equações 4.J1 e 4.J2, poderíamos tomar qualquer um dos valores com representativos do calor específico, uma vez que a própria variabilidade na composição do solo apresenta oscilação que apresentem resultados muito diversos do valor obtido. Acrescente-se que as medidas efetuadas são em solo seco artificialmente, mas no caso do Campus USP-São Paulo, uma área pantanosa aterrada, o solo geralmente contém alto índice de umidade.

O valor de difusividade ou a condutividade térmica substituída na equação de dimensionamento de sistema GSHP permite que se determine, por exemplo, o comprimento de tubo de polietileno de alta densidade (r = 0,0189m) que deve ser empregado num sistema GSHP horizontal retirando 1000 W do prédio e depositando-o no solo a 2 metros de profundidade, para que a temperatura na posição do tubo sofra um aumento 6K ao final de um mês de uso, comparado com a temperatura do solo em estado natural.

6.2) Propostas de Continuação do trabalho

Uma vez entendido o universo tecnológico dos sistemas GSHP e demonstrada a capacidade de avaliação dos parâmetros envolvidos, o próximo passo no PIPGE-IEE/USP é a instalação, na casa de madeira referida, de um sistema GSHP associado a um sistema de coleta de dados que permita acompanhar o sistema funcionando. Estudos sistemáticos podem permitir estudar procedimentos para implementar sua eficiência, avaliação da economia de energia envolvida, custo do ciclo de vida, etc.

Como são inter-relacionadas, a implementação das outras propostas apresentadas é fundamental para que se tenha uma avaliação global do impacto de todos os equipamentos e sistemas na economia de energia do prédio. Em particular, as intervenções no forro, criando-se barreiras térmicas e implementando o sistema de ventilação por convecção devem concorrer para aproximar o ambiente às condições de conforto, reduzindo desta forma a necessidade de uso de condicionadores de ar.

CAPÍTULO 7 REFERÊNCIAS

ABU-00 – Abu-Hamdeh, N.H., "Effect of tillage Treatments on Soil Thermal Conductivity for some Jordanian Clay Loam and Loam Soils" – Soil & Tillage Research 56 –145 2000

ANA-01 – Anandakumar, K.; Venkatesan, R.; Prabha, T.V. "Soil Thermal Properties at Kalpakkam in Coastal South India" Proc. Indian Acad. Sci. (Earth Planet.Scie.) 110 (3) 239-245 2001

ASH-82 -ASHRAE Handbook - Applications. - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers – Atlanta– 1982

ASH-89 - ASHRAE Standard 90.1 "Energy Efficient Design of New Buildings Except New Low Rise Residential Buildings" American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, GA - 1989

ASH-95 -ASHRAE Handbook of Heating. Ventilating and Air-Conditioning Applications - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers 1995

ASH-95b -ASHRAE Handbook of Heating. Ventilating and Air-Conditioning Applications - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers .29.14 1995

ASH-95c -ASHRAE Handbook of Heating. Ventilating and Air-Conditioning Applications - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers – 29.20 1995

ASH-95d -ASHRAE Handbook of Heating. Ventilating and Air-Conditioning Applications - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers – 29.20 1995

ASH-95e -ASHRAE Handbook of Heating. Ventilating and Air-Conditioning Applications - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers – 29.23 1995

ASH-95f -ASHRAE Handbook of Heating. Ventilating and Air-Conditioning Applications – "Heat Transfer in Lakes" American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers – 29.23/24 1995

ASH-95h -ASHRAE Handbook of Heating. Ventilating and Air-Conditioning Applications – "Closed-Loop Lake Coil in Bundles" American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers – 29.24 1995

ASH-97 American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineering, "Fundamentals" 3.1 1997

AWA-03 Awal, M.A.; Ikeda, T.; Itoh, R. "The Effect of Soil Temperature on Source-Sink Economy in Peaut (Arachis hypogaea)" Environ. and Exp. Botany 50 41-50 2003

BEC-88 Beck,A.E. "Methods for Determining Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity" Handbook of Terrestrial Heat-Flow Density Determination, of Haenel,R.; Rybacch,L. and Stegena,L (eds.) 87-124 1988

BEL-03 Beltrami, H.; Kellman, L. "An Examination of Short- and Long-Therm Air-Ground Temperature Coupling" Global And Planetary Change 38 291 2003

BOR-96 - Borsh-Laaks, R. and Pohlmann, R. "The Triple-E House - Energy Efficient, Economical and Ecological", Proceedings from the 1996&1994 ACEEE Summer Studies on Energy Efficiency in Buildings - American Council for an Energy-efficient Economy - 9.51 – 1996

BOS-85 – Bose, J.E.; Parker,J.D.; McQuiston,F.C. – "Design/Data for Closed-Loop Ground-Coupled Heat Pump Systems"- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. 1985

BRI-93 Bristow, K. L.; Campbell, G. S.; Calissendorff, C. (1993). "Test of a heat-pulse probe for measuring changes in soil watercontent". Soil Science Society of America Journal, 57, 930–934 1993

BRI-94 Bristow, K.L.; Kluitenberg, G.J. and Horton, R. "Measurement of Soil Thermal Properties with a Dual-Probe Heat-Pulse Technique", Soil Science Society of America Journal, 58, 1288–1294 1994

BUL-73 Bullard, E.. *Basic Theories (*Geothermal Energy; Review of Research and Development) UNESCO, Paris, França 1973

CAM-91 Campbell, G.S.; Calissendorf, C. and Williams,J.H. – "Probe for Measuring Soil Specific Heat using a Heat-Pulse Method" Soil Sci. Soc. Am. J. 55 291-293 1991

CAM-98 Campbell, G.S. and Norman, J.M. "An Introduction to Environmental Boiphysics" Springer-Verlag, N.Y. 2nd ed. 1998

CAM-01 Camargo, R., comunicação pessoal com cessão de dados de temperatura ambiente do IAG-USP Água Funda do período 1997-2000 2001

CAM-91a Campbell, G. S.; Callissendorff, C.; Williams, J. H. ." Probe for measuring soil speci.c heat using a heat pulse method". Soil Science Society of America Journal, 55, 291–293 1991

CAR-47 – Carslaw, H.S. e Jaeger, J.C. ; "Conduction of Heat in Solids" Claredon Press, Oxford, caps.1,2,3,7,8,9,11 and app.L, 1947

CLO-98 - "Closed Loop Ground Source Design" - Oklahoma State University, - http://www.geoexchange.org/dsgntool/grldes4.htm acesso em 1998

DIC-01 – Dickinson; M.H. and Fanelli, M. "What is Geothermal Energy?" http://www.iga.igg.cnr.it/geothermal.php – International Geothermal Association - Acesso em 2001

ECI-88 "Tabela de Calibração do Termômetro de Resistência" ECIL S.A. Produtos e Sistemas de Medição e Contrôle cap2 pp. 3 1988

ELB-96 - Elberling, L.E.; Bourne, R. C. "ACT^2 Project Results: Maximizing Residential Energy Efficiency" Proceedings from the 1996&1994 ACEEE Summer Studies on Energy Efficiency in Buildings - American Council for an Energy-efficient Economy - 1.81 1996

ERE-01 – "Consumer Energy Information – EREC Fact Sheets"-Energy Efficiency and Renewable Energy Network- US Department of Energy - http://www.eren.doe.gov/erec/factsheets/geo_heatpumps.html acesso em 2001

EVE-94 – Evett, S.R. "TDR-Temperature Array for Analysis of Field Soil Thermal Properties" in Proceedings of the Symposium on time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure and Mining Applications, Sep,7-9 Northwestern University, Evanston, Illinois 1994

FED-98 Federal Technology Alert - Ground Source Heat Pumps Applied to Commercial Facilities -U.S. Department of Energy http://www.pnl.gov/fta/2_ground.htm 10 – acesso em 1998

FED-98c Federal Technology Alert - Ground Source Heat Pumps Applied to Commercial Facilities -U.S. Department of Energy http://www.pnl.gov/fta/2_ground.htm 6– acesso em 1998

FLO-96 - Floyd, D.B.; Parker,D.S.; Sherwin, J.R. “Measured Field Performance and Energy Savings of Occupancy Sensors: Three Case Studies” - Proceedings from the 1996&1994 ACEEE Summer Studies on Energy Efficiency in Buildings - American Council for an Energy-efficient Economy - 4.97 - 1996

GEO-98a – Geothermal Heat Pump Consortium’s – http://www.ghpc.org/public/series/diagram1.gif acesso em 1998

GEO-98b – Geoexchange Information Center – “Grounded in good sense” http://www.ghpc.org/public/pub-art/grga-art.htm acesso em 1998

GEO-98c – Geoexchange Information Center – “Lighthouse Terrace Housing, Pensacola NAS” http://www.ghpc.org/cases/cs0077.htm acesso em 1998

GEO-98d – Geoexchange Information Center – “Case Studies Directory” http://www.ghpc.org/cases/dircases.htm acesso em 1998

GEO-98e – Geoexchange Information Center – “Geothermal Confort In Minnesota, Princenton, MN” http://www.ghpc.org/cases/cs0021.htm acesso em 1998

GEO-98f – Geoexchange Information Center – “Condo/Commercial Development, British Columbia” http://www.ghpc.org/cases/cs0057.htm acesso em 1998

GEO-98g – Geoexchange Information Center – “Scenic St. George, Utah, Viewing Low Energy Bills” http://www.ghpc.org/cases/cs0054.htm acesso em 1998

GEO-98h – Geoexchange Information Center – “Speranza Del Sol” http://www.ghpc.org/cases/cs0019.htm acesso em 1998

GEO-98i – Geoexchange Information Center – “Garden East Apartments, South Australia” http://www.ghpc.org/cases/cs0036.htm acesso em 1998

GEO-98j – Geoexchange Information Center – "Hillside Oaks, East Dallas, Texas" http://www.ghpc.org/cases/cs0055.htm acesso em 1998

GEO-98k – Geoexchange Information Center – "Millenium House 1995" http://www.ghpc.org/cases/cs0018.htm acesso em 1998

GEO-98l – Geoexchange Information Center – "Braun's Bicycle Store, Kitchener, Ontário, Canadá" http://www.ghpc.org/cases/cs0014.htm acesso em 1998

GEO-98m – Geoexchange Information Center – "Corps of Engineers Headquarters, Walla Walla, Washington" http://www.ghpc.org/cases/cs0071.htm acesso em 1998

GEO-98n – Geoexchange Information Center – "Du Pont Medical Center, Fort Wayne, Indiana" http://www.ghpc.org/cases/cs0008.htm acesso em 1998

GEO-98o – Geoexchange Information Center – "Holiday Inn Express, Albany, New York" http://www.ghpc.org/cases/cs0009.htm acesso em 1998

GEO-98p – Geoexchange Information Center – "North Boneville City Hall, North Boneville," http://www.ghpc.org/cases/cs0069.htm acesso em 1998

GEO-98q – Geoexchange Information Center – "GeoExchange Saving Millions at Fort Polk, Louisiana" http://www.ghpc.org/cases/cs0033.htm acesso em 1998

GEO-98r – Geoexchange Information Center – "Fort Polk Base Housing, Louisiana" http://www.ghpc.org/cases/cs00.htm acesso em 1998

GEO-98s – Geoexchange Information Center – "Fort Irwin, California" http://www.ghpc.org/cases/cs0032.htm acesso em 1998

GEO-98t – Geoexchange Information Center – "Marine Corps Air Station, New River, North Carolina" http://www.ghpc.org/cases/cs0078.htm acesso em 1998

GEO-98u – Geoexchange Information Center – "Patuxent River Naval Air Station, Maryland" http://www.ghpc.org/cases/cs0064.htm acesso em 1998

GEO-98v – Geoexchange Information Center – "Northwest Louisiana Juvenile Detention Center" http://www.ghpc.org/cases/cs0062.htm acesso em 1998

GEO-98w – Geoexchange Information Center – "Federally Sentenced Women's Facility, Truro, Nova Scotia" http://www.ghpc.org/cases/cs0082.htm acesso em 1998

GEO-98x – Geoexchange Information Center – "Cambria County Prison, Pennsylvania" http://www.ghpc.org/cases/cs0067.htm acesso em 1998

GEO-98y – Geoexchange Information Center – "Daily Family YMCA, Oklahoma" http://www.ghpc.org/cases/cs0017.htm acesso em 1998

GEO-98z – Geoexchange Information Center – "Daniel Boone High School, Washington County, Tennessee" http://www.ghpc.org/cases/cs0090.htm acesso em 1998

GEO-98a1 – Geoexchange Information Center – "Paint Lick Elementary School, Kentucky" http://www.ghpc.org/cases/cs0030.htm acesso em 1998

GEO-98a2 – Geoexchange Information Center – "Bob McMath School, Richmond, B.C. Canadá" http://www.ghpc.org/cases/cs0075.htm acesso em 1998

GEO-98a3 – Geoexchange Information Center – "Great Bridge Middle School South, Virginia" http://www.ghpc.org/cases/cs0023.htm acesso em 1998

GEO-98a4 – Geoexchange Information Center – “Applications of Geothermal Heat Pumps” http://www.ghpc.org/cases/agr-sect.htm acesso em 1998

GEO-98a5 – Geoexchange Information Center – “Horticultural Uses of GeoExchange Heat Pumps” http://www.ghpc.org/cases/cs0030.htm acesso em 1998

GEO-98a6 – Geoexchange Information Center – “Water Source Heat Pump Prove Their Mettle on the Water” http://www.ghpc.org/cases/cs0045.htm acesso em 1998

GEO-98a7 – Geoexchange Information Center – “Phillips 66 Service Station” http://www.ghpc.org/cases/cs0013.htm acesso em 1998

GEO-00 – Geoexchange Information Center – “Richard Stockton College of New Jersey” http://vulcan.geo-phys.stockton.edu/main_geo.html acesso em 2000

GHA-85 Ghauman, B.S.; Lal, R. “Thermal Conductivity, Thermal Diffusivity and Thermal Capacity of some Nigerian Soils” Soil Sci. 139 74-80 1985

GLI-96 - Glicksman, L.R; Taub, S. “Energy Efficiency of Occupant Controlled Heating, Ventilating and Air Conditioning Systems for Office Buildings” - Proceedings from the 1996&1994 ACEEE Summer Studies on Energy Efficiency in Buildings - American Council for an Energy-efficient Economy - 4.125 1996

GRO-98 Ground Source Heat Pump - "Manual" - Commonwealth of Pennsylvania Department of Environmental Protection –pp 3 http://www.dep.state.pa.us/dep/deputate/w...sm/WSM_DWM/SrceProt/HeatPump/gshpttoc.htm – acesso em 1998

GUI-97 “Guia para Expressão da Incerteza de Medidas” Primeira Edição Brasileira do Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement – Sociedade Brasileira de Metrologia; INMETRO e ABNT 1997

HER-59 Herzen, R.Von; Maxwell, A.E. – "The measurement of Thermal Condutivity of Deep-Sea Sediments by a Needle-Probe Method" – Journal of Geophysical Research-(64)10 1557-63, 1959

HER-96 - Hernandez, G.; Katipamula, S.; Spehar, J. and Pratt, R.G. "Analysis of Hybrid Cooling System at an ACT^2 Pilot Demonstrative Site" Proceedings from the 1996&1994 ACEEE Summer Studies on Energy Efficiency in Buildings - American Council for an Energy-efficient Economy - 4.165- 1996

HOR-83 Horton, R.; Wierenga, P.J. and Nielsen, D.R. "Evaluation of Methods for Determining the apparent Thermal Diffusivity of Soil Near the Surface"; Soil Science Society of America Journal 47 25-32 1983

HOW-98 How Stuff Works - http://www.howstuffworks.com/ac.htm – acesso em 1998

HUA-03 Huang, Z.; Zhang, X. Zheng, G.; Gutterman, Y. "Influence of Light, Temperature, Salinity and Storage on Seed Germination of Haloxylon ammodendron" Journal of Arid Environ. 55 453-564 2003

HUG-96 Hughes P.J. and Shonder, J.A., Oak Ridge National Laboratory "Geothermal Heat Pumps at Fort Polk: Early Results" Proceedings From the 1996 -American Council for an Energy-Efficient Economy - Summer Studies on Energy Efficiency in Buildings, published by ACEEE, 1001 Conecticut Av., N.W. suite 801 Washington, DC 20036 1996

ING-54 Ingerssol, L.R.; Zobel, O.J.; "Heat Conduction with Engineering, Geological and other Apliccation" – Maple Press Co.,York, Pennsylvania 1-154 1954

INT-95 – International Ground Source Heat Pump Association – "The Source" http://www.igshpa.okstate.edu/Publications/source/1995/9508/aug95.htm#Earth

Acesso em 1995

INT-98 - International Ground Source Heat Pump Association “Ground-source heat pumps Frequently Asked Questions” – http://ourworld.compuserve.com/homepages/davenrgman/geotfaq.htm -last updated 4/98 Acesso em 1998

JAE-42 Jaeger, J.C., “Proc.Roy.Soc.Edinburgh”, 61, 233 1942

JAE-58 Jaeger, J.C. , “The Measurement of Thermal Condutivity and Difusivity with cylindrical probes” – Trans.Am.Geophys.Union, 39 (708-710) 1958

KAV-92a Kavanaugh, S. K.,. "Demand and Energy Study of High EfficiencyHeating and Cooling Equipment in Oregon." Presented at Ground Source HeatPumps - A Natural for the Northwest, Portland, OR. Sponsored by OregonInstitute of Technology, Geo-Heat Center, Klamath Falls, OR. 1992

KAV-92b Kavanaugh, S. K., 1992b. "Demand and Energy Study of High Efficiency Heating and Cooling Equipment in Georgia." Geo-Heat Center Quarterly Bulletin, Vol. 14, No. 1, Oregon Institute of Technology, Geo-Heat Center, Klamath Falls, OR. 1992

KIK-85 Kikoin, I. K.; Kikóin, A.K “Física 2” *Imprenta* Moscú : Mir, 1985.

KLU-93 Kluitenberg, G. J.; Ham, M.; Bristow, K. L. . “Error analysis of the heat-pulse method for measuring the volumetric heat capacity of soil”. Soil Science Society of America Journal, 57, 1444–1451 1993

LAM-90b - Lamberts, R. “Simulação numérica da taxa de ventilação de Áticos” - Anais do I encontro nacional de conforto no ambiente construído - Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - Porto Alegre, RS (41) 1990

LAR-88 Larson, T.H., "Thermal Measurement of Soils Using a Multineedle Probe with a Pulsed-Point Source"- Geophysics (53)2 266-70 1988

LUB-68 – Lubimova, E.A. ""Thermal History of the Earth" em: The Earth's Crust and Upper Mantle, Amer. Geophys. Mon. Ser., 13 63-77 1968

MAR-98b - Maritime Geothermal Ltd.- Manufacturers of Nordic Geothermal Heat Pumps – http://www.discribe.ca/nordic/rclosdloopartpage.htm acesso em 1998

MAT-99 – Matsumoto, S.; Yoshino, H.; Akasaka, H. "A Program for Ground Temperature Data Generation Based on the Expanded AMeDAS Weather Data CD-Roms" http://hvac.okstate.edu/pdfs/bs99/papers/pa.17.pdf acesso em 1999

MOH-98 Mohanty, B.P; Shouse,M.T.; van Genuchten,M.T. – "Spatio-Temporal Dynamics of Water and Heat in a Field Soil" Soil & Tillage Research 47 133 1998

NEI-95 McNeil, C.S.L; Crawford,T.K; Eggerton,B. "Vertical Borehole Groundloop Heat Pump Installation" -Advanced Building Newsletter – Royal Architectural Institute of Canada pp. 1 vol. 1 n^0 8 1995

NEW-98 New Jersey Heat Pump Council "What are Ground Source/Geothermal Heat Pumps? http://www.njhpc.org/njh_grnd.html acesso em 1998

NOR-98 Nordic Geothermal Heat Pump System – http://www.discribe.ca/nordic/dxheatcycle.htm acesso em 1998

OCH-01 Ochsner, T.E.; Horton,R. and Ren, T. "A New Pesrpective on Soil Thermal Properties" Soil Science Society of America Journal 65: 1641-1647 2001

PAR-79 Parikh, R. J.; Havens, J. A.; Scott, H. D. “Thermal diffusivity and conductivity of moist porous media”. Soil Science Society of America Journal, 43, 1050–1052 1979

PEZ-90 – Pezent. M. C. and Kavanaugh, “Development and Verifications of a Thermal Model of Lakes Used With Water-Source Heat Pumps” – ASHRAE Transactions 96(1), 574-82 - 1990

PIG-96 - Pigg, S.; Eilers, M.; Reed, J., “Behavioral Aspects of Lighting and Occupancy Sensors in Private Offices: A Case Study of a University Office Building” Proceedings from the 1996&1994 ACEEE Summer Studies on Energy Efficiency in Buildings - American Council for an Energy-efficient Economy - 8.161 1996

RIS-02 Risk, D.; Kellman,L.; Beltrami,H. “Carbon Dioxide in Soil Profiles: Production and Temperature Dependence”Geophys. Res. Lett. 29 (6) 10.291 2002

SFU-03 “Soil Temperature and Heat flow” – http://www.sfu.ca/~bquinton/teaching/geog311/11_soilthermal.pdf acesso em 2003

SHO-00 Shonder, J.A.; Beck,J.V. “A New Method to Determine the Thermal Properties of Soil Formations from In Situ Fields Tests” Report do Oak Ridge National Laboratory para U.S. DoE #04 2000

SOU-98b Sound Geothermal, Co. "A Guide Showing Heating Savings using a GHP http://www.soundgt.com/compare.htm #Types of Systems acesso em 1998

SPI-92 Spiegel, M.R. “Manual de Fórmulas, Métodos e Tabelas de Matemática”- Makron Books do Brasil Editora Ltda. 2ª edição p. 211 1992

TIT-96 - Titus, E., “Advanced Retrofit: A Pilot Study In Maximum Residential Energy Efficiency” Proceedings from the 1996&1994 ACEEE Summer Studies on Energy Efficiency in Buildings - American Council for an Energy-efficient Economy - 1.239- 1996

WAT-99 WaterFurnace Geoth. System http://www.waterfurnace.com/technology.html acesso em 1999

WIL-03 Willians, G.P.; Gold, L.W. “CBD-180. Ground Temperatures”Institute for Research in Construction- National Research Council Canada http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/cbd/cbd180e.html acesso em 2003

Apêndice A “PROPOSTAS DE SISTEMAS PARA CONDICIONAMENTO DE AMBIENTE E SISTEMAS COMPLEMENTARES”

A abordagem da questão energética em prédios deve ser feita em várias frentes simultaneamente, como é o caso da iluminação artificial associada com controle de temperatura, umidade, ventilação e iluminação natural. Mesmo quando tratamos apenas um parâmetro, soluções combinadas podem produzir resultados mais eficientes que soluções individuais. Com este enfoque, são apresentadas propostas de intervenção utilizando vários equipamentos e métodos, alguns complementares e outros concorrentes, na tentativa de minimizar o consumo de energia dentro dos prédios:

GRUPO 1 : REDUÇÃO DA ENERGIA INCIDENTE SOBRE AS CONSTRUÇÕES

1.1) Redutores de radiação solar incidente: orientação do edifício; protetores solares de face norte e corredor de face sul.

1.2) Estudo da refletância solar e emitância de infravermelho no telhado dos prédios como forma de redução da carga térmica nos interiores

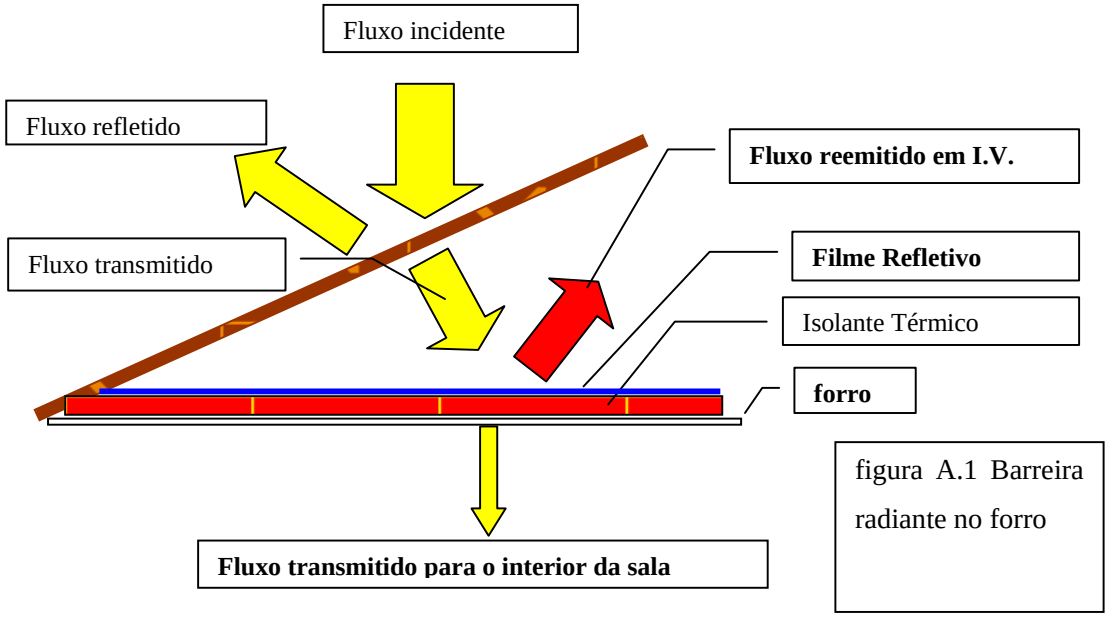


figura A.1 Barreira radiante no forro

1.3) Uso de barreira radiante sobre o forro

Pretende-se quantificar o impacto da barreira radiante pela medida de várias temperaturas e do consumo de eletricidade antes e depois de sua instalação na parte inferior do forro.

1.4) Filtro de radiação luminosa, com corte de parte do visível e infra-vermelho.

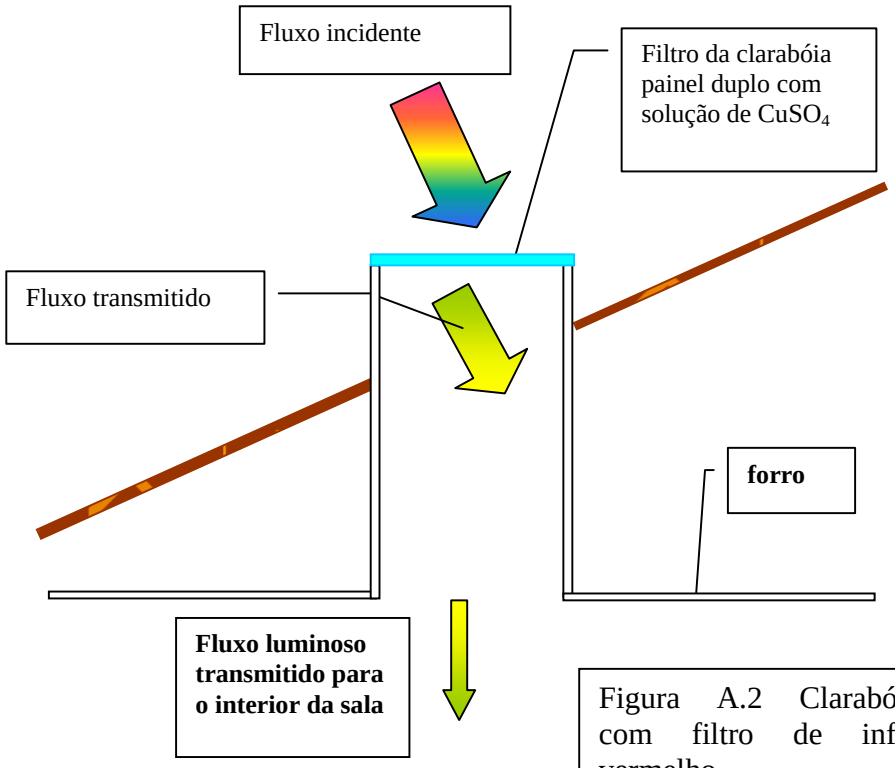

Fluxo incidente
Filtro da clarabóia painel duplo com solução de $CuSO_4$
Fluxo transmitido
forro
Fluxo luminoso transmitido para o interior da sala

Figura A.2 Clarabóia com filtro de infra vermelho

Método de avaliação: monitoramento através de sensores de temperatura dispostos no telhado, forro e interior da sala.

1.5) Sistema de ventilação de ar independentes, no interior das salas e no forro

A ventilação do ático pode ser usada para remoção de calor e umidade. No verão, esta ventilação é usada para remoção do ar superaquecido pela telha e, no inverno, é usada para remoção da umidade que penetra através do forro e que de outra forma poderia vir a condensar quando em contato com a telha fria. (**LAM-90b**). A taxa de

ventilação está normalmente associada ao uso de aberturas na cumeeira. Quando estas aberturas estão associadas a aberturas sob o beiral, pode-se aproveitar a convecção para aumentar a taxa de ventilação (na existência de vento) ou para propiciá-la quando há calmaria.

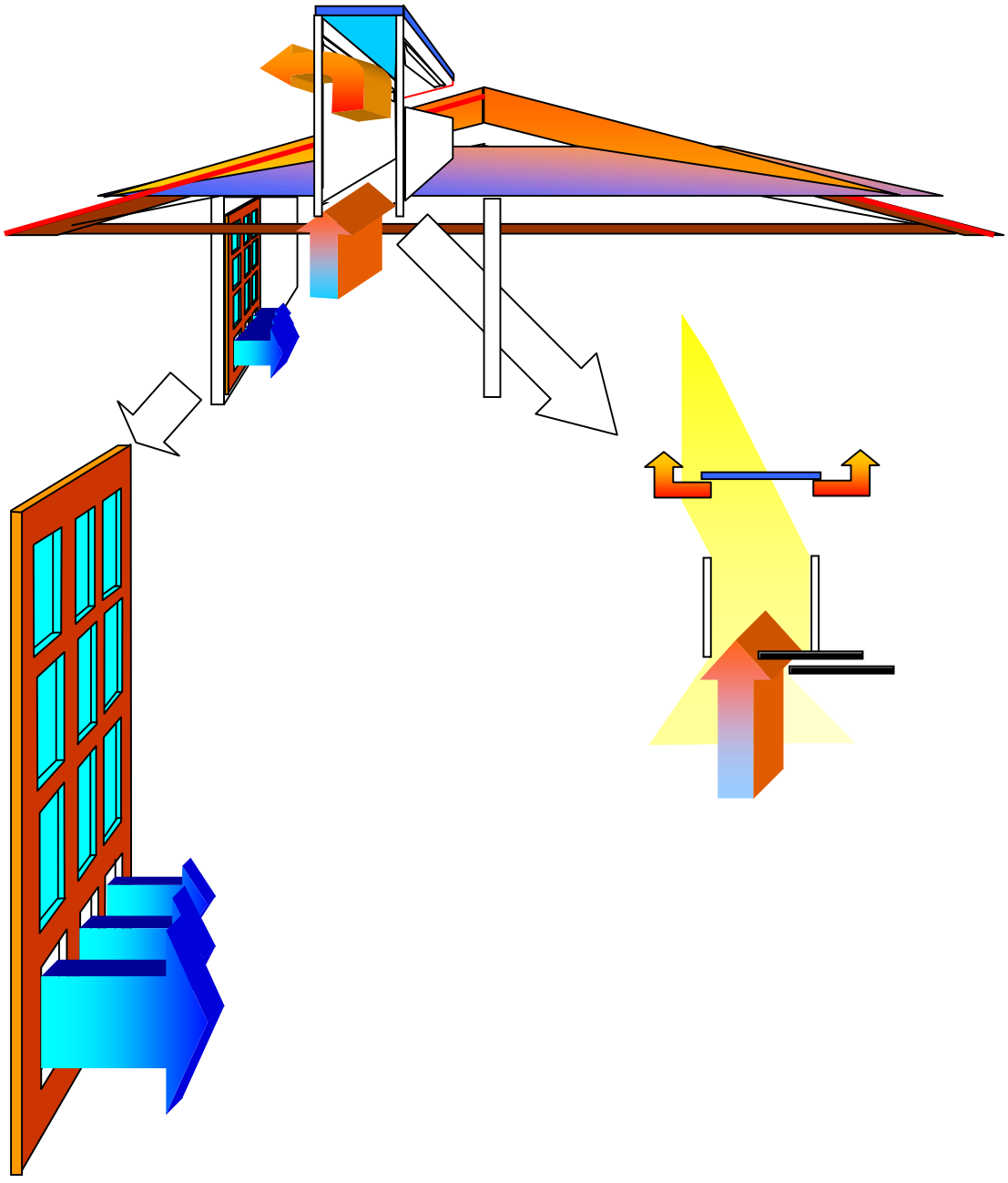


Figura A.3 O sistema de ventilação das salas com clarabóia de abertura regulável, além de sistema de entrada de ar pela porta. Na parte superior da clarabóia é colocado um filtro solar com painel de vidro duplo contendo solução de Sulfato de cobre ($CuSO_4$)

1.6) Dimerização da iluminação natural e artificial

Sistema de controle de iluminação natural e artificial que permita manter a iluminação sobre o plano de trabalho dentro de uma faixa previamente definida.

GRUPO 2 : CONDICIONAMENTO DO AMBIENTE INTERNO

2.1) Sistema de troca térmica com o solo

Implantação de um sistema horizontal de troca térmica localizado no solo associado a uma bomba de calor para condicionamento de uma das salas do prédio dos Alunos. Utilização do equipamento para estudos das propriedades termofísicas do solo, do potencial de troca térmica, consumo de energia e demais parâmetros relevantes.

2.2) Sistema de troca de calor por evaporação, para refrigeração do prédio número 2

O sistema de refrigeração por evaporação tem por princípio a diminuição da temperatura de um dado líquido à medida que ele evapora. Estes sistemas podem ser de alta eficiência energética, adequado à política de preservação ambiental e significativamente barato para o uso em climas secos. Alem da alta eficiência energética, também podem reduzir o pico de consumo energético. Com o aumento das pressões para que se diminua o uso de clofluorcarbonos (CFC) e melhoria da qualidade do ar, a substituição de equipamentos de refrigeração por sistema evaporativo torna-se cada vez mais interessante. O efeito da redução -direta ou indiretamente-, dos sistemas de refrigeração por equipamentos térmicos reduz os custos de operação, preserva os recursos naturais e diminui a poluição ambiental (**HER-96**).

Existem várias configurações possíveis dos sistemas de refrigeração evaporativos:

a) Refrigeração evaporativa direta (RED)

b) Refrigeração evaporativa indireta (REI)

c) Refrigeração evaporativa indireta multiestágios (REIM)

d) Refrigeração evaporativa direta-indireta (REDI)

e) Refrigeração mecano-evaporativa indireta (RMEI)

O sistema RED envolve o processo de evaporação de água em um fluxo de ar que está em contato com água circulante, usando um bico de spray, meio úmido ou combinação dos dois. Psicrometricamente, o processo é adiabático, já que o calor sensível removido do fluxo de ar para evaporar água resulta em aumento do calor latente. Portanto, o RED não reduz a carga total no fluxo de ar, apenas troca uma forma de carga por outra (fig. A.4)

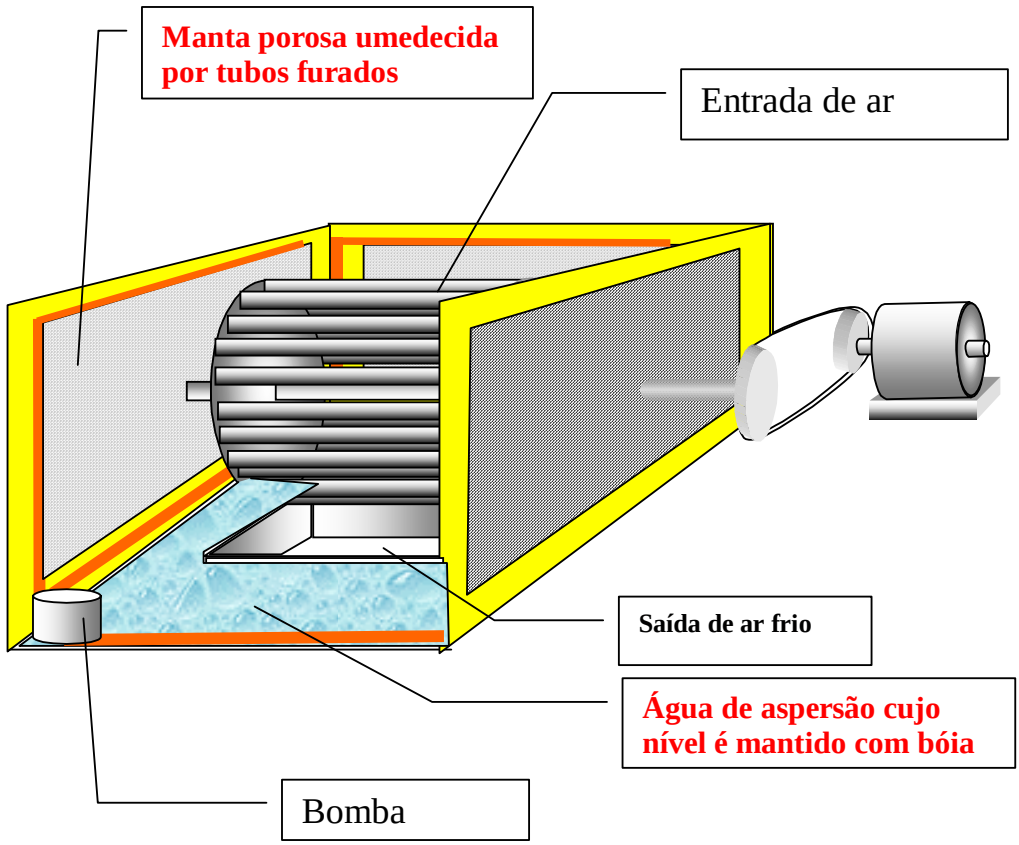

Manta porosa umedecida por tubos furados
Entrada de ar
Saída de ar frio
Água de aspersão cujo nível é mantido com bóia
Bomba

Fig. A.4 Sistema direto evaporador RED

O sistema REI refrigera o ar sem aumentar a taxa de umidade absoluta do ar. Este processo utiliza dois fluxos de ar separados que nunca se misturam ou têm contato direto. Um dos fluxos, o úmido, passa através do processo de refrigeração por evaporação direta e

é resfriado e umidificado. O segundo fluxo, o fuxo processado, passa através de um trocador de calor ar-ar adequado, trocando calor com o fluxo frio e úmido do primeiro estágio. A refrigeração indireta de estágio único rebaixa a temperatura do ar processado até a temperatura de bulbo úmido do fluxo úmido, que é geralmente o ar ambiente. Aumentando o número de estágios, aumenta-se sua performance. A performance global do sistema multiestágios depende da eficiência individual de cada refrigerador de evaporação e dos processos de troca de calor.

A tecnologia de refrigeração evaporativa é geralmente utilizada em climas secos. A integração dos conceitos do sistema evaporativo com equipamentos de condicionamento de ar, ventilação e aquecimento (HVAC em inglês), aumenta o potencial de aplicação e as oportunidades de conservação de energia para uma região geográfica maior. Em sistemas híbridos, o sistema evaporativo de estágio único ou o multi-estágios é integrado em série com uma unidade de refrigeração de expansão direta (sistema mecânico).

No sistema híbrido testado por Hernandez et al (**HER-96**), o qual tem um sistema evaporativo de duplo estágio associado a um sistema de refrigeração mecânico, foi verificado que o sistema mecânico raramente era ligado, mesmo durante o verão. Durante as horas de trabalho ao longo da semana (8 às 17 horas), entre junho e setembro, um dos compressores trabalhou 5% do tempo e o outro, apenas 3%. Isto indica que o sistema evaporativo de duplo estágio provê mais de 90% das necessidades anuais de refrigeração.

2.3) Painéis fotovoltaicos associados a mini-ventiladores e bomba d'água para o sistema de troca térmica com o solo

Instalação de painéis fotovoltaicos para fornecer energia aos mini ventiladores posicionados dentro das mesas de trabalho (figuras A.5 e A.6), projetadas especialmente para uso nas salas em questão. O sistema de bombeamento de água do equipamento de condicionamento também deve ser acionado pelos mesmos painéis. Este sistema deve ser híbrido: energia hidrelétrica e fotovoltaica, ligadas por uma interface eletrônica que decidirá quando será necessário o uso da energia externa ao sistema. O sistema deve entrar em operação sempre que as condições ambientais forem desfavoráveis ao conforto. No caso de

falta de energia fotovoltaica (baixa insolação, chuva, etc), o sistema aciona a alimentação por energia hidrelétrica.

O monitoramento do sistema permite o calculo de sua eficiência e economia de energia da rede elétrica.

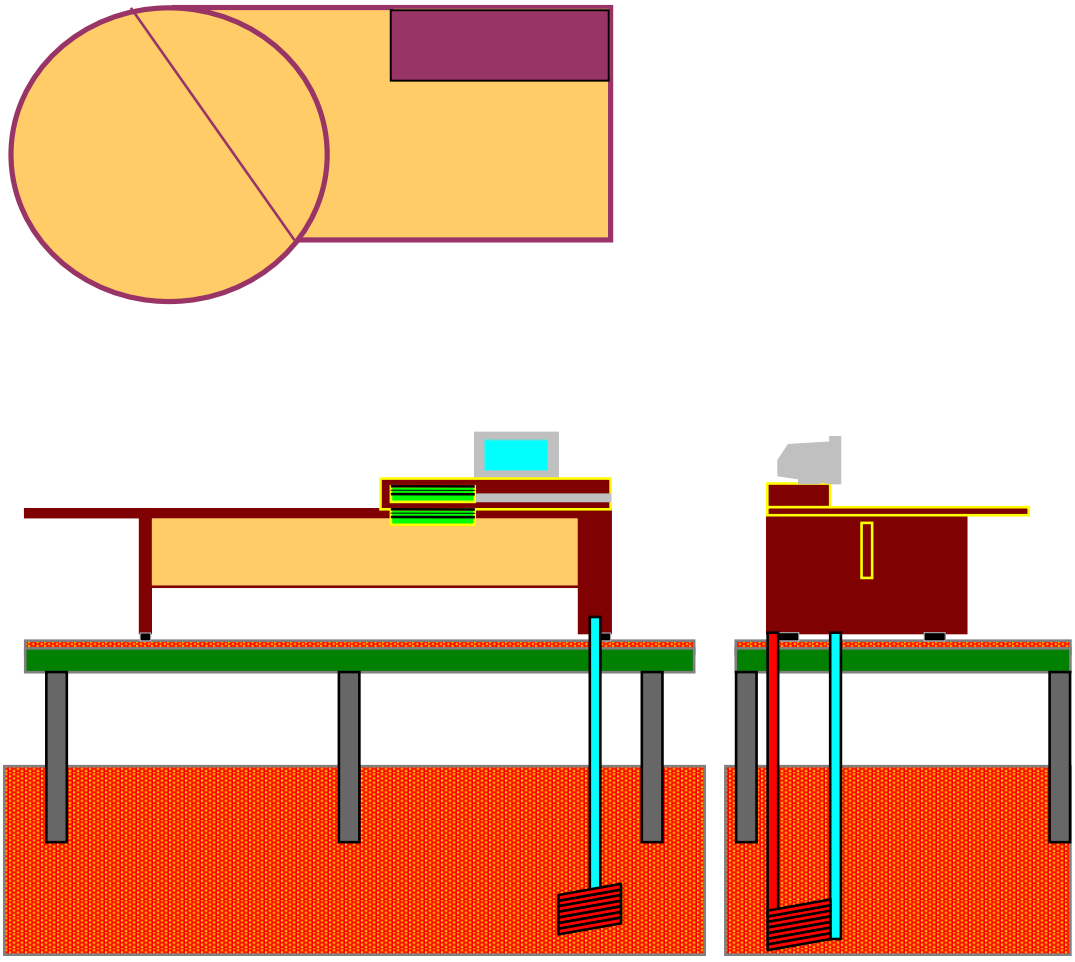


fig. A.5 Mesa com sistema de ventilação e trocadores de calor

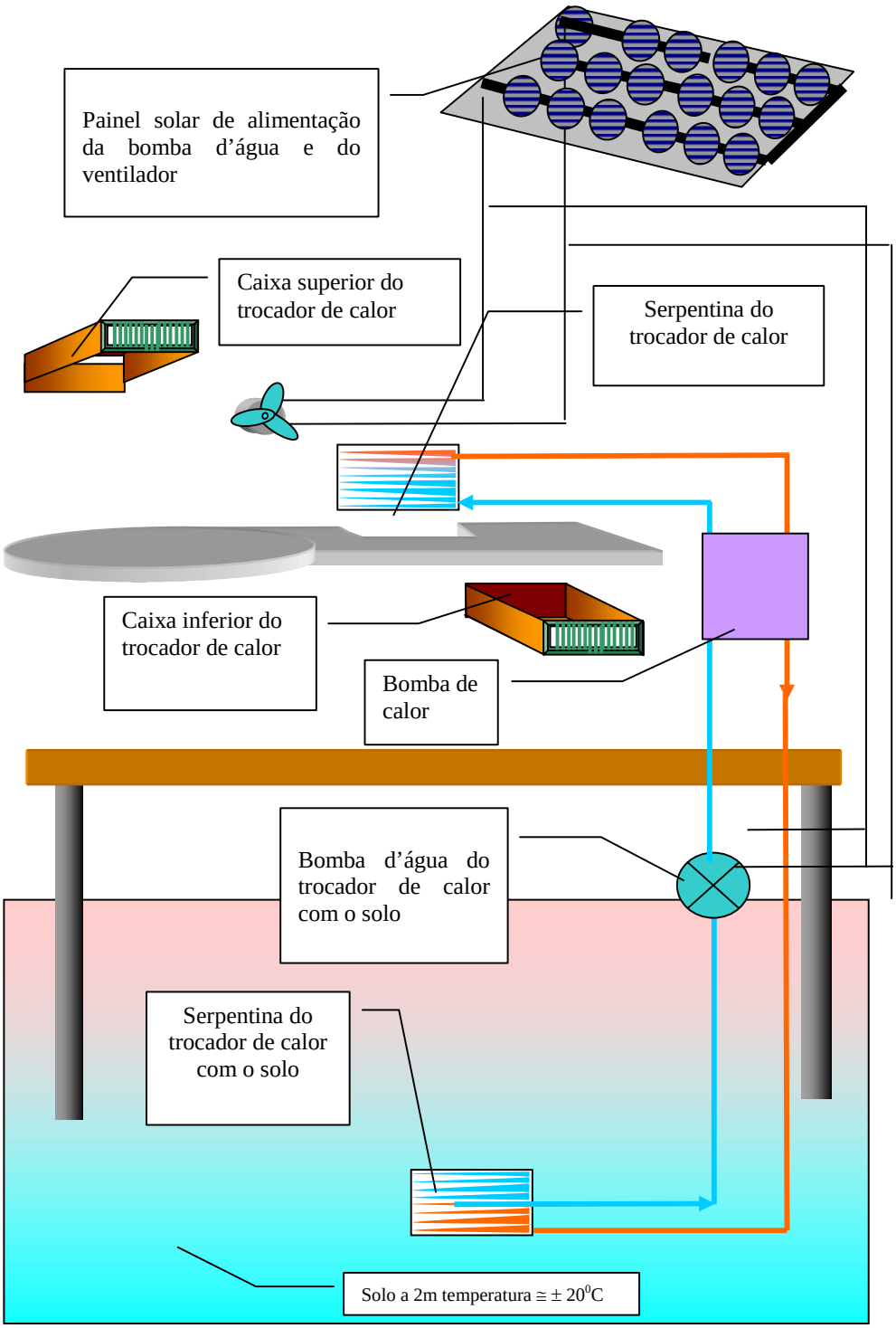
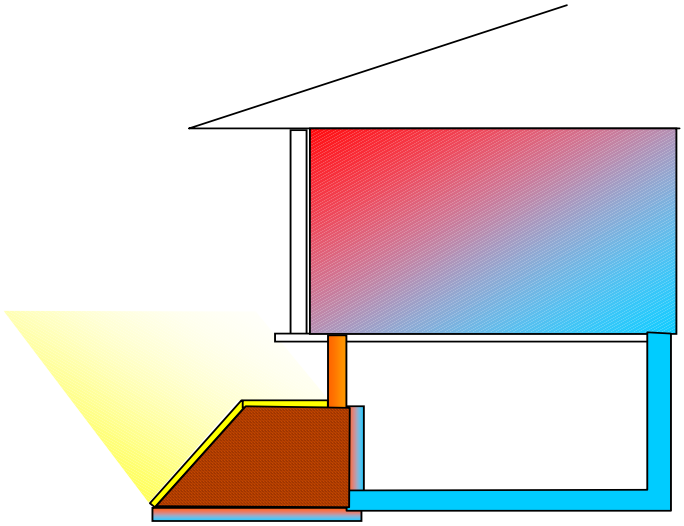

Painel solar de alimentação da bomba d'água e do ventilador
Caixa superior do trocador de calor
Serpentina do trocador de calor
Caixa inferior do trocador de calor
Bomba de calor
Bomba d'água do trocador de calor com o solo
Serpentina do trocador de calor com o solo
Solo a 2m temperatura ≅ ± 20^{0}C

Fig. A.6 Sistema fotovoltaico associado ao trocador de calor

2.4) Sistema de troca de calor com o ambiente utilizando caixa de pedras

Utilização da inércia e da capacidade térmica de uma caixa de pedras como dispositivo para condicionamento de ambiente



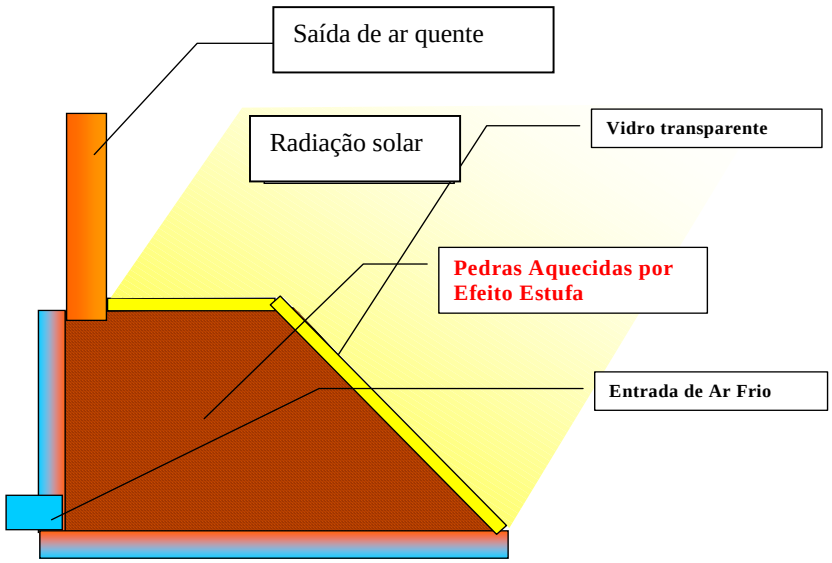


Figura A.7 Detalhes da caixa de de pedras para armazenamento de energia térmica durante o dia e aquecimento de ambiente à noite

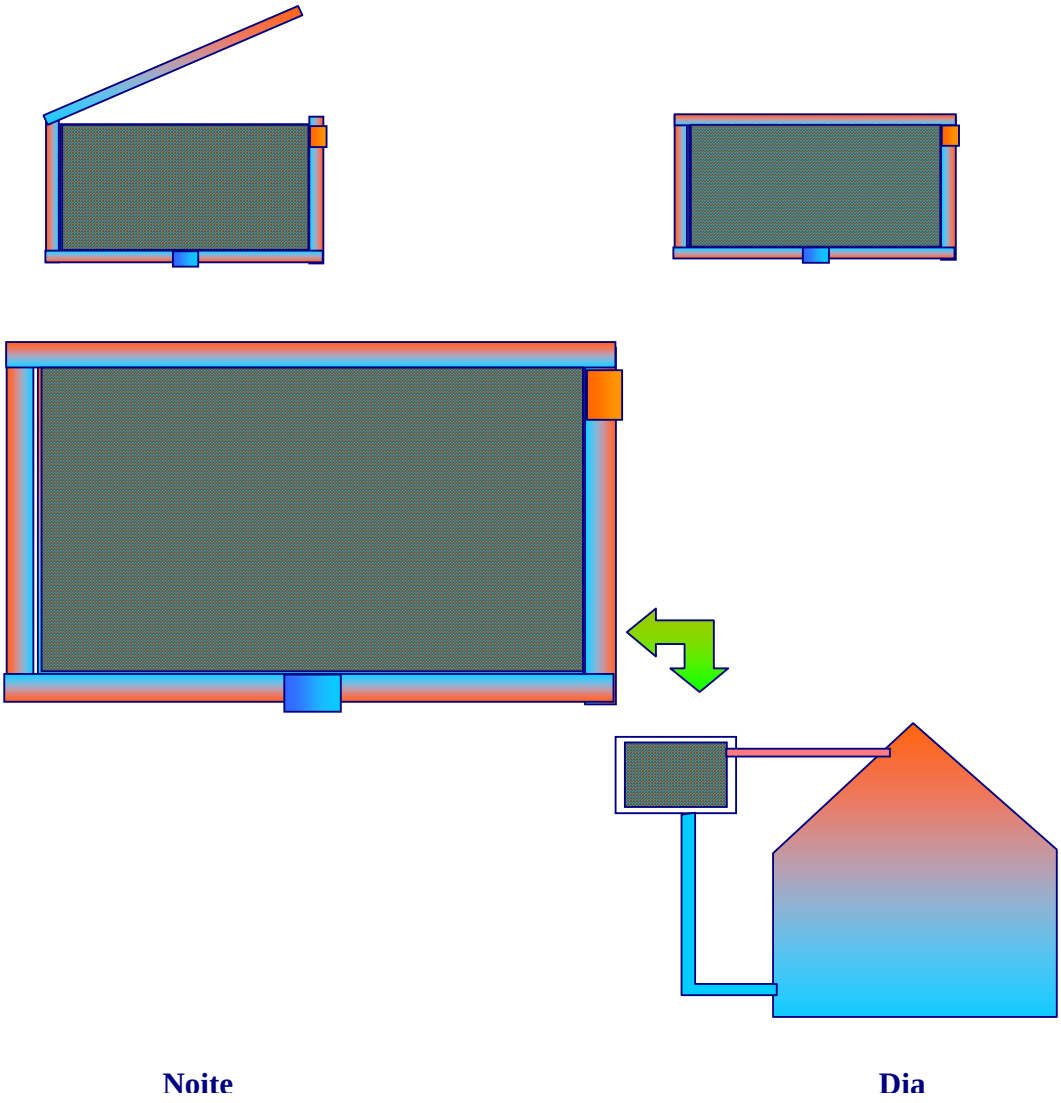


Figura A.8 Detalhes da caixa isolada termicamente preenchida com pedras que é mantida aberta no período noturno para esfria-las. Durante o dia a caixa é fechada para refrigerar a edificação.

2.4) Uso, no interior das paredes do prédio de salas de aula, de material isolante termo-acústico e proteção por quebra-sol das paredes face norte (prédio Salas de Aula)

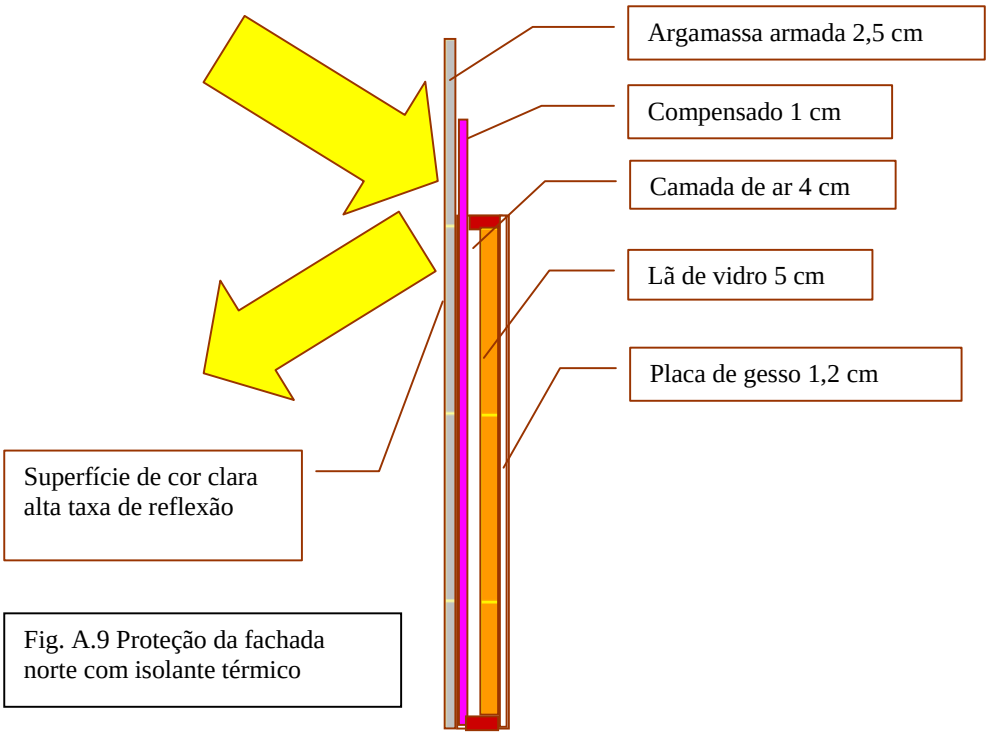

Argamassa armada 2,5 cm
Compensado 1 cm
Camada de ar 4 cm
Lã de vidro 5 cm
Placa de gesso 1,2 cm
Superfície de cor clara
alta taxa de reflexão

Fig. A.9 Proteção da fachada norte com isolante térmico

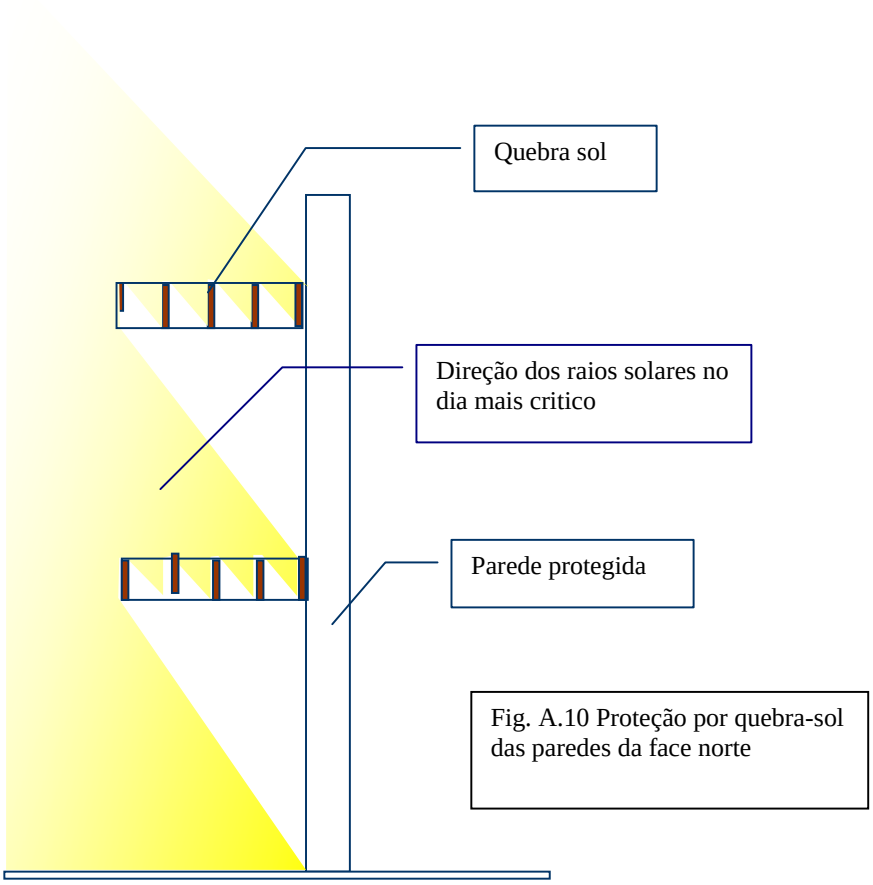


Fig. A.10 Proteção por quebra-sol das paredes da face norte

2.5) Construção do lago-reservatório de água de chuva para consumo dos sanitários e do sistema de refrigeração por evaporação. Painéis fotovoltaicos para movimentação de bomba d'água do lago (caixas d'água e oxigenação)

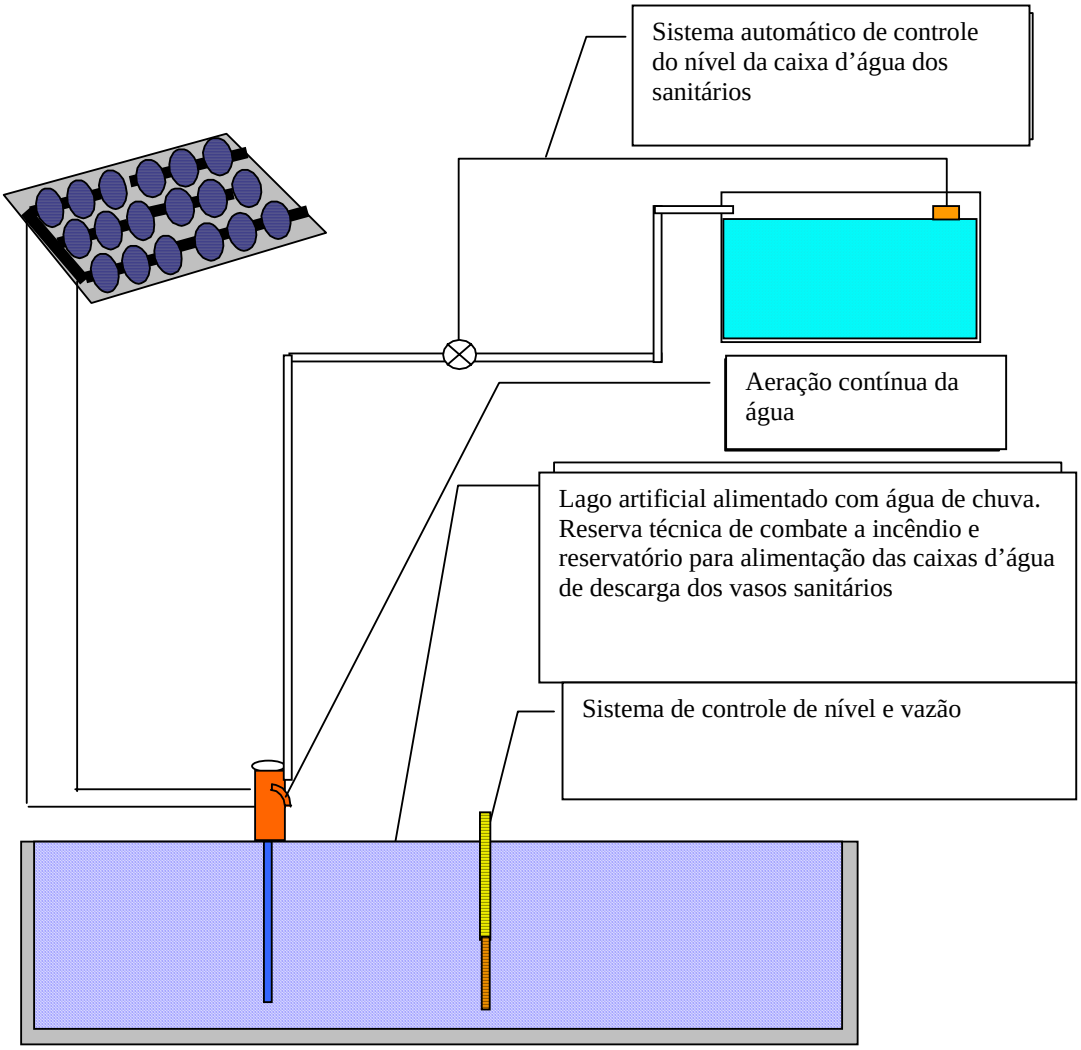

Sistema automático de controle do nível da caixa d'água dos sanitários
Aeração contínua da água
Lago artificial alimentado com água de chuva. Reserva técnica de combate a incêndio e reservatório para alimentação das caixas d'água de descarga dos vasos sanitários
Sistema de controle de nível e vazão

Fig. A.11 Lago artificial e sistema de controle de nível e vazão de água

GRUPO 3 : SISTEMAS DE CONTROLE DE EQUIPAMENTOS

3.1) Controle automático assistido por computador para aumento da eficiência energética dos seguintes sistemas e equipamentos instalados no prédio:

- Sistema de ventilação
- Sistema de ar condicionado
- Sensores de presença
- Sistema de controle de iluminação artificial e natural
- Fechaduras eletrônicas
- Integradores de consumo de energia
- lâmpadas de baixo consumo energético e alta eficiência

Os sistemas de controle de equipamentos de condicionamento do ambiente construídos têm um potencial de economia de energia elétrica ainda não explorado. Trabalhos como o de Glicksman e Taub (**GLI-96**), explorando as potencialidades de sistemas de condicionamento controlados pelos usuários de prédios de escritórios, tem mostrado potenciais de economia de energia de até 22%. Neste estudo, os ocupantes podem definir quais os limites do conforto local para sua área de trabalho, o que provoca uma não uniformidade na distribuição de temperaturas no espaço condicionado e afetando diretamente o consumo global de energia. Em áreas não ocupadas, permitem-se limites mais brandos, de forma a reduzir a carga necessária de condicionamento. Glicksman sugere que estudos mais detalhados sobre o comportamento dos usuários podem contribuir para a melhoria de design da construção e dos sistemas de condicionamento.

Está prevista a instalação, em salas previamente escolhidas, de sistemas interligados de detectores de presença, padlocks e interruptores de luz. No sistema de iluminação, estão sendo instaladas lâmpadas fluorescentes e luminárias de última geração, de baixo consumo de energia. O sistema automático prevê um medidor de nível de aclaramento sobre o plano de trabalho que, sempre que a iluminação natural for inferior a 500 lux, acione o sistema de iluminação. Estes sistemas serão comparados com o sistema manual, onde o usuário liga as lâmpadas -do mesmo tipo do sistema automático- sempre que achar necessário. A partir daí serão feitos estudos de consumo de energia das salas munidas deste equipamento com as

salas com controle manual e salas com e sem iluminação zenital (obstruindo a passagem de luz de uma delas).

sensores de presença

Os sensores de presença (também chamados de ocupação ou de movimento) têm um potencial significativo de redução do consumo de energia pelo desligamento de equipamentos elétricos quando um recinto normalmente ocupado pelo usuário fica vazio. Ele pode ser utilizado para controlar uma grande variedade de equipamentos, mas a forma de uso mais comum é o controle de iluminação em prédios comerciais. Os fabricantes destes equipamentos afirmam que a economia de energia está na faixa de 15% a 85%, embora existam poucas pesquisas publicadas que dêem respaldo a esta magnitude de redução de consumo. A performance e economia de energia destes equipamentos estão relacionadas diretamente com a potência dos equipamentos a serem controlados, eficiência dos métodos de controle, comportamento dos usuários e uso adequado dos sensores. Os sensores passivos de infravermelho (SPI) detectam a diferença na radiação de ondas longas (infravermelho) entre o objeto e o fundo. No sensor, uma lente composta divide a área monitorada em zonas triangulares: quando ocorre uma mudança na temperatura infravermelha em uma determinada zona -tal como a produzida pelas mãos de uma pessoa-, isto é interpretado como um movimento, e o sistema de luz é acionado. Se nenhum movimento é detectado em um determinado espaço de tempo (tipicamente ajustável de 30 segundos a 30 minutos), o sistema de luz é desligado. Entretanto, a tecnologia de SPI requer grande campo de visão e as mobílias e divisórias podem prejudicar sua operação. Sensores múltiplos podem ser utilizados nos espaços grandes e a montagem no forro pode ser necessária para uma detecção efetiva. Detecções falsas podem ocorrer quando a unidade é colocada perto de sistemas de ar condicionado, devido às mudanças de temperatura nos arredores do campo de visão.

Sensores ultra-sônicos (SU) emitem onda sonora de baixa intensidade e alta freqüência (20 a 40 kHz), detectando o movimento a partir das mudanças no padrão de reflexão do som. Quando a assinatura acústica do espaço é alterada, o dispositivo manda um sinal para o sistema de iluminação. Se nenhum movimento é detectado dentro de um

período estabelecido, a iluminação é desligada. Estes sensores podem cobrir grandes áreas, inclusive com divisórias. Entretanto, podem ser sensíveis a falsos sinais, como movimentos de ar, ventiladores de teto, etc.

O terceiro tipo de sensores de presença, chamado híbrido ou unidade de tecnologia dual, usam ambas as tecnologias: SPI e SU - com intenção de se ter uma detecção mais confiável. Podem eliminar quase totalmente os sinais falsos, tem grande sensibilidade e podem admitir "time delays" pequenos, mas tem custo elevado. A diminuição dos intervalos de tempo para desligamento do sistema e o liga-desliga freqüente podem afetar a rotina dos ocupantes de salas adjacentes e prejudicar a vida das lâmpadas e reatores.

Os sensores de ocupação tem despertado o interesse de prédios e de concessionárias de energia elétrica pelo baixo custo de implantação e alto potencial de economia de energia. Nos EUA, a American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), estima uma economia média de 30% com o uso desta tecnologia em prédios comerciais (**ASH-89**). Vários estudos tem sido publicados nos EUA indicando bom potencial de economia de energia com a instalação destes dispositivos.

Em uma situação de iluminação comandada por controle de ocupação, a operação de iluminação pelo usuário surge como fator determinante do potencial de economia de energia. Geralmente, a redução do consumo de energia para iluminação por sensores de presença segue aproximadamente a taxa de ociosidade da sala. A economia de energia depende da responsabilidade dos usuários em desligar a iluminação de áreas desocupadas. Para estudar o potencial real de economia de energia e a participação do comportamento dos usuários de prédios no resultado final, Floyd et al (**FLO-96**) utilizaram três situações diferentes (em tamanho, comportamento dos ocupantes, densidade e estratégias de controle) : um prédio de escritórios pequeno e duas escolas básicas. Para se calcular o impacto da utilização dos sensores, o consumo de energia foi acompanhado antes e depois da instalação dos dispositivos, que consistiam de lâmpadas fluorescentes T12 com reatores magnéticos. O consumo foi monitorado em um datalogger multicanal, varredura a cada dez segundos e armazenamento da média a cada 15 minutos. Os dados foram transmitidos automaticamente para um computador via

modem e linha telefônica dedicada. Após um período de amostragem de seis meses pré-modificação do sistema, no Flórida Solar Energy Center, Cabo Canaveral, foram instalados 23 sensores SPI e SU. Devido a problemas com o mau funcionamento de alguns sensores, que acusavam falso sinal positivo (falsa presença de pessoas na sala), o sensor ligava a iluminação e o total de economia não passou de 7%. Após a substituição de três destes sensores, a alteração da posição e sensibilidade de um outro sensor -que detectava a fonte de calor de uma impressora laser, acusando falso positivo- e a diminuição do tempo de espera para desligar a iluminação, de 15 minutos par 7 minutos, a economia total chegou a 20% (fig. A.12)

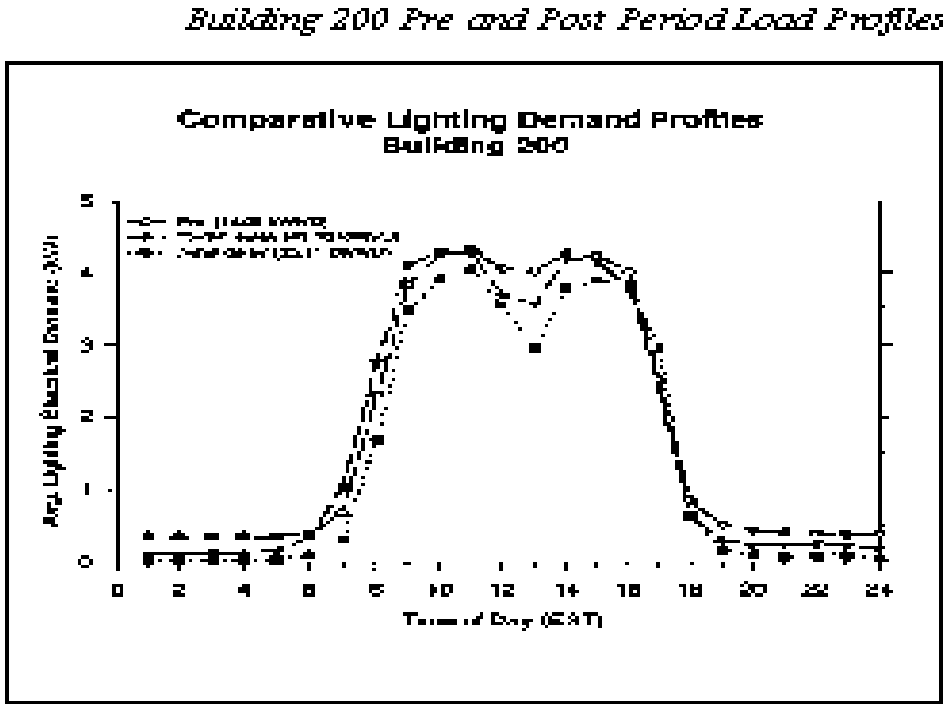


fig. A.12 demanda de iluminação em prédio estudado pelo Flórida Solar Energy Center

Comportamento diverso do esperado foi encontrado nos finais de semana, onde o consumo de energia foi maior que o consumo antes da instalação dos dispositivos. O motivo era que antes das alterações, o usuário desligava imediatamente as luzes quando saída da sala e, após a instalação dos sensores, havia um tempo extra de iluminação por

conta do tempo de espera. Outro motivo é que o usuário movendo-se pelo prédio ativa mais lâmpadas do que ocorre quando o controle é manual. No caso deste edifício, apesar das alterações não terem se mostrado economicamente viáveis (período de amortização do investimento de 18,2 anos), este trabalho é importante para o estudo dos fatores que afetam a performance dos sensores de presença em instalações de pequena escala.

Em outro trabalho, no Northwest Elementary School, Pasco County, Flórida, aproximadamente 33 salas de aula, 7 salas de escritório e uma cafeteira foram equipadas com um total de 46 SPI, a economia média encontrada foi de 10.8%, com período de amortização de 3,6 anos a taxa de 28%. Este resultado foi considerado excelente pelos autores, posto que a escola já possuía, antes das alterações, um sistema de iluminação eficiente e operado com responsabilidade.

No terceiro estudo de caso, no prédio do Fellsmere Elementary School, Florida, um total de 59 sensores foram instalados, com a expectativa de se obter uma redução significativa nos 17% de participação da iluminação na conta total de energia elétrica. A primeira análise mostrou um aumento do consumo nos dias de aula de aproximadamente 27% e, nos dias sem aula, de diminuição de 20%. Um esforço posterior, na qual foram realizados reajustes dos sensores, com a redução do tempo de espera para desligamento do sistema de iluminação, realmente conseguiu reduzir significativamente o consumo; mesmo assim, ficou acima do consumo registrado antes da instalação dos dispositivos, como pode ser visto na fig. A.13.

Os autores suspeitam que os motivos para tal aumento do consumo foram: sensores emitindo sinais positivos falsos; usuários fazendo entrada momentâneas nas salas; o tempo demasiado longo de religamento do sistema (intervalo de tempo do sistema entre o desligamento e religamento, de no mínimo 11 segundos), o que induziu alguns usuários a modificarem o tempo de espera para o máximo disponível (15 minutos). Um resumo dos três estudos de caso é apresentado na fig. A.14, onde são apresentados também os balanços de consumo de energia após a instalação dos dispositivos.

Fellsmere Elementary Before and After the OC Installation

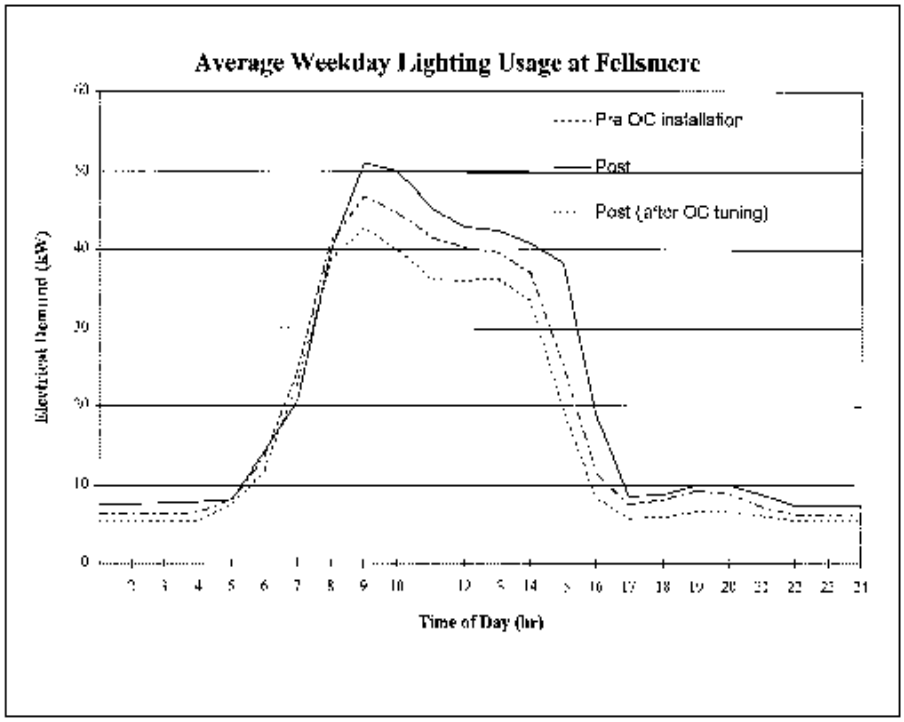


fig. A.13 Demanda de energia em uma escola americana

Outro importante trabalho de sistematização e avaliação da performance dos sensores de presença foi realizado num prédio de escritórios dentro do campus da Universidade de Wiscousin, em Milwaukee, por Pigg et al (**PIG-96**). O estudo foi concebido para testar a eficiência e avaliação da relação custo-benefício dos sensores de presença e dois sistemas de controle de iluminação.

Foram testadas quatro estratégias diferentes nos sessenta e três escritórios escolhidos -sempre utilizando luminárias fixadas no teto, de 3 bulbos, com lâmpadas T8. A maioria das salas possui 2 luminárias- :

Configuração Standard: Chaveamento de iluminação de duplo nível, com sensor de presença. Este tipo de chaveamento permite ao usuário controlar o nível de iluminação com dois interruptores de parede: o primeiro liga o bulbo central de cada luminária, o outro liga as duas lâmpadas restantes. Foram utilizados sensores de presença modelo

DT100L Watt Stoppers, tecnologia dual, para desligar a iluminação se a sala estiver vazia. O tempo de espera foi regulado entre 6 e 21 minutos, dependendo do comportamento da sala.

. *Summary of Results from Three Case Studies of Occupancy Sensor Retrofit*

Site	Building 200	Northwest Elementary	Fellsmere Elmentary
Building Type	Small office	Elementary school	Elementary school
Floor Area(Ft^2)	5, 000	58,000	35,000
Lighting Load (kW)	9.7	110.0	59.0
Sensor Time Delay (min)	15 minutes (initial) 7 minutes (final)	10 minutes	12-15 minutes (initial) 7 minutes (final)
Baseline Annual Light kWh	12,509 12,509	246,481	108,004
Estimated Annual Savings kWh*	1,084 2,060	26,420	(-15,444)
Installed Cost	$2,354	$6,067	$15,446
Savings	10% 19%	11%	Negative
Payback (Yrs)	34.7 18.2	3.6	None

* These are direct savings. Total savings are approximately 25% greater since HVAC interactions are included.

fig. A.14 resumo dos três estudos de caso

Grupo de controle: Idêntico ao grupo standard, mas com os sensores de presença desligados do comando do sistema de iluminação. Se o usuário esquece a iluminação ligada, ela ficará ligada. Embora estes sensores não controlem a iluminação, são importantes para o monitoramento de presença das salas. Como a configuração standard, as salas do grupo de controle têm chaveamento dual.

Iluminação automática de nível duplo: Os escritórios usam um foto-sensor no DT100L para chavear o bulbo central de cada luminária, em resposta ao nível de iluminação natural da sala. Um interruptor simples de parede permite ao usuário controlar as lâmpadas externas da luminária. A lâmpada central é controlada exclusivamente pela

fotocélula, acionando sempre que a luminosidade estiver baixa e a sala ocupada. Todo o sistema fica ligado até a sala estar vazia e o tempo de espera se esgotar.

Iluminação Contínua: Utiliza uma fotocélula montada no teto e reator eletrônico dimerizável para ajuste contínuo do nível de iluminação artificial em resposta ao nível de iluminação natural da sala. O reator permite dimerização da luz das lâmpadas fluorescentes de 20% a 100%. Um interruptor simples permite que o usuário ligue e desligue a iluminação, mas não permite ajuste de intensidade, que é controlada automaticamente pela fotocélula. Estas salas também estão equipadas com sensores de presença.

Foram utilizados cinco dataloggers TF32 associados aos sensores para monitorar o consumo de energia utilizada para iluminação. Alem disto, foi acompanhado de perto, por meio de visitas periódicas, o comportamento dos usuários quanto ao consumo de energia para iluminação e a influência dos dispositivos instalados nas mudanças comportamentais ocorridas ao longo do período de estudo. Na fig. A.15 são mostrados os gráficos construídos a partir dos dados de cada grupo de ocupação nos dias úteis da semana.

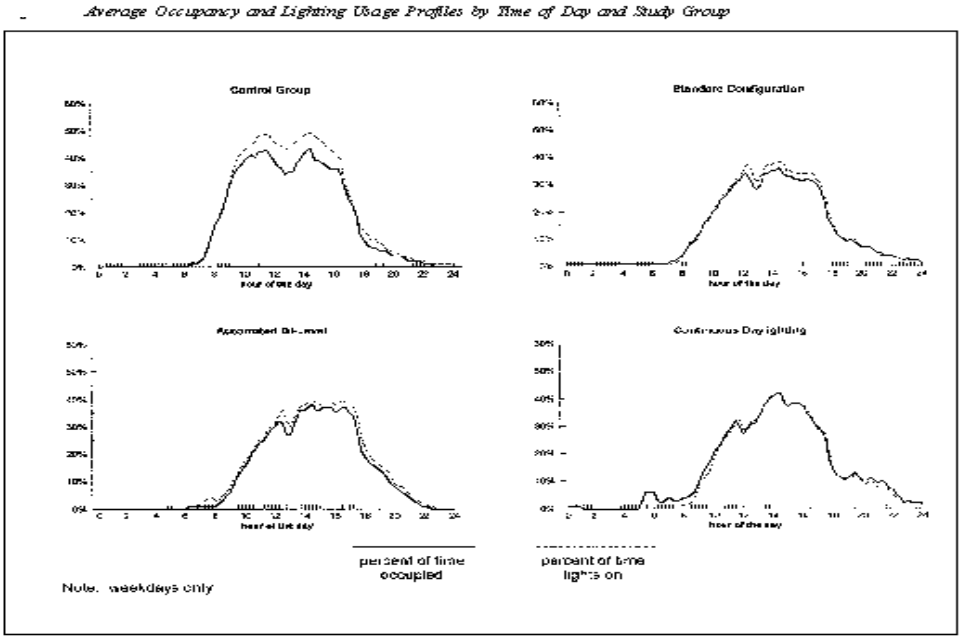

Average Occupancy and Lighting Usage Profiles by Time of Day and Study Group
Control Group
Standard Configuration
Continuous Daylighting
percent of time occupied
percent of time lights on
Note: weekdays only

fig.A.15 medidas de iluminação realizadas dentro da Universidade de Wiscousin

Calculou-se a economia gerada pelos sensores de ocupação (em horas por ano), comparando o tempo que as luzes estavam ligadas enquanto a sala estava desocupada no grupo de controle e no grupo com configuração standard. O grupo de controle diz quanto tempo as luzes estão ligadas nas salas sem controle de presença e o grupo standard, quanto tempo as luzes estão ligadas enquanto a sala está desocupada nas salas com sensores. A diferença entre as duas nos dá o impacto líquido provocado pelos controles, dando uma média anual de 164 horas, ou 14% do total anual utilizado pelo grupo de controle. Para estimar quanto os sensores podem economizar se os usuários não alterarem seu comportamento na presença dos controles, usa-se o fato de o grupo de controle possuir sensores de presença que não controlam as lâmpadas. Por simples contagem do tempo que as luzes permaneceram ligadas e o monitoramento indicava que o sensor havia dado o sinal de desligar a iluminação, pode-se calcular o tempo que poderia ser economizado se os sensores estivessem conectados com as lâmpadas, dando um total de 234 horas. Como o sensor não atua sobre o controle de iluminação, acredita-se que este resultado seja a economia total que se obtém sem que as pessoas percebam os dispositivos, e por isto, não alterem seu comportamento. A diferença entre as duas estimativas dá a magnitude da componente comportamental de economia de energia quando comandada por sensores de presença: 234-164 = 70 horas por ano, ou 30% do total (fig. A.16), reforçando a idéia que o aspecto comportamental dos usuários tem grande influência sobre o potencial de economia de energia com utilização de sensores de presença.

Fechaduras Eletrônicas

Os “padlocks” (fechaduras eletrônicas comandadas por cartões magnéticos), auxiliam no sistema de segurança do prédio, reconhecendo através do cartão, o usuário presente na sala e os horários de entrada e saída. Auxilia também no controle de iluminação e no sistema de condicionamento do ambiente, complementando as informações dos sensores de presença. Deve ser instalado um padlock para cada sala, tanto no prédio 1 quanto no prédio 2.

. Average Occupancy Sensor Savings by Time of Day, Showing Behavioral Effect

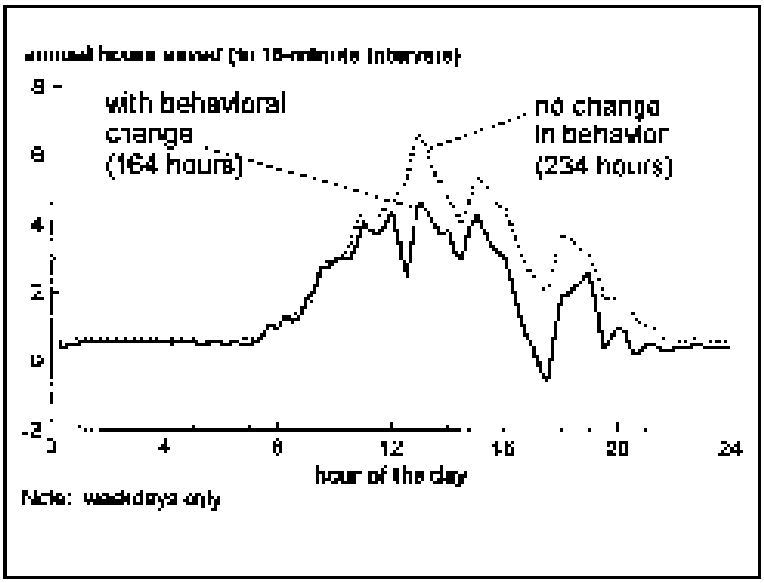


fig. A.16 economia de energia devido aos sensores de presença

integradores de consumo de energia

Equipamentos que medem o consumo de energia diferencial e integral a serem instalados nos prédios para o acompanhamento das alterações de consumo de energia com a instalação dos equipamentos propostos. Devem ser instalados medidores de consumo do prédio todo e de consumo por sala.

Todas as informações sobre comportamento de equipamentos de iluminação, sensores de presença, padlocks, sistemas de condicionamento de ar, etc, serão centralizadas em um micro-computador dedicado à coleta de dados. Através de softwares adequados, devem ser feitas as interpretações dos dados colhidos.

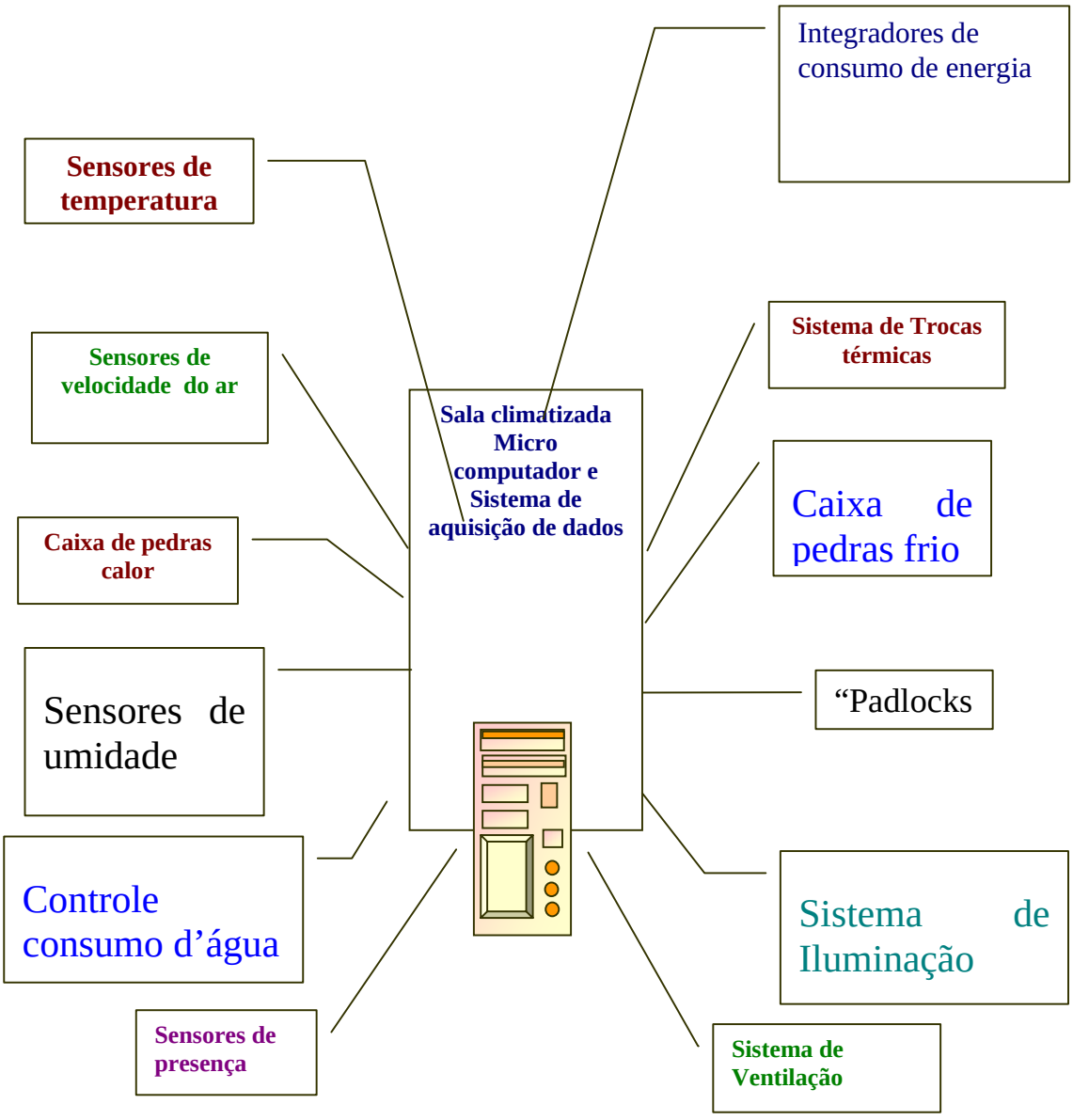


Fig. A.17 Sistema de controle dos equipamentos e sistemas de ventilação, ar condicionado, presença, consumo d’água e sensores de temperatura, umidade, radiação e integradores de energia instalados em sala climatizada

GRUPO 4 : SISTEMA DE COMBATE A INCÊNDIO

4.1) Uso do lago artificial como parte do sistema de combate a incêndio do conjunto arquitetônico. Conexão do lago ao sistema de detecção de incêndio.

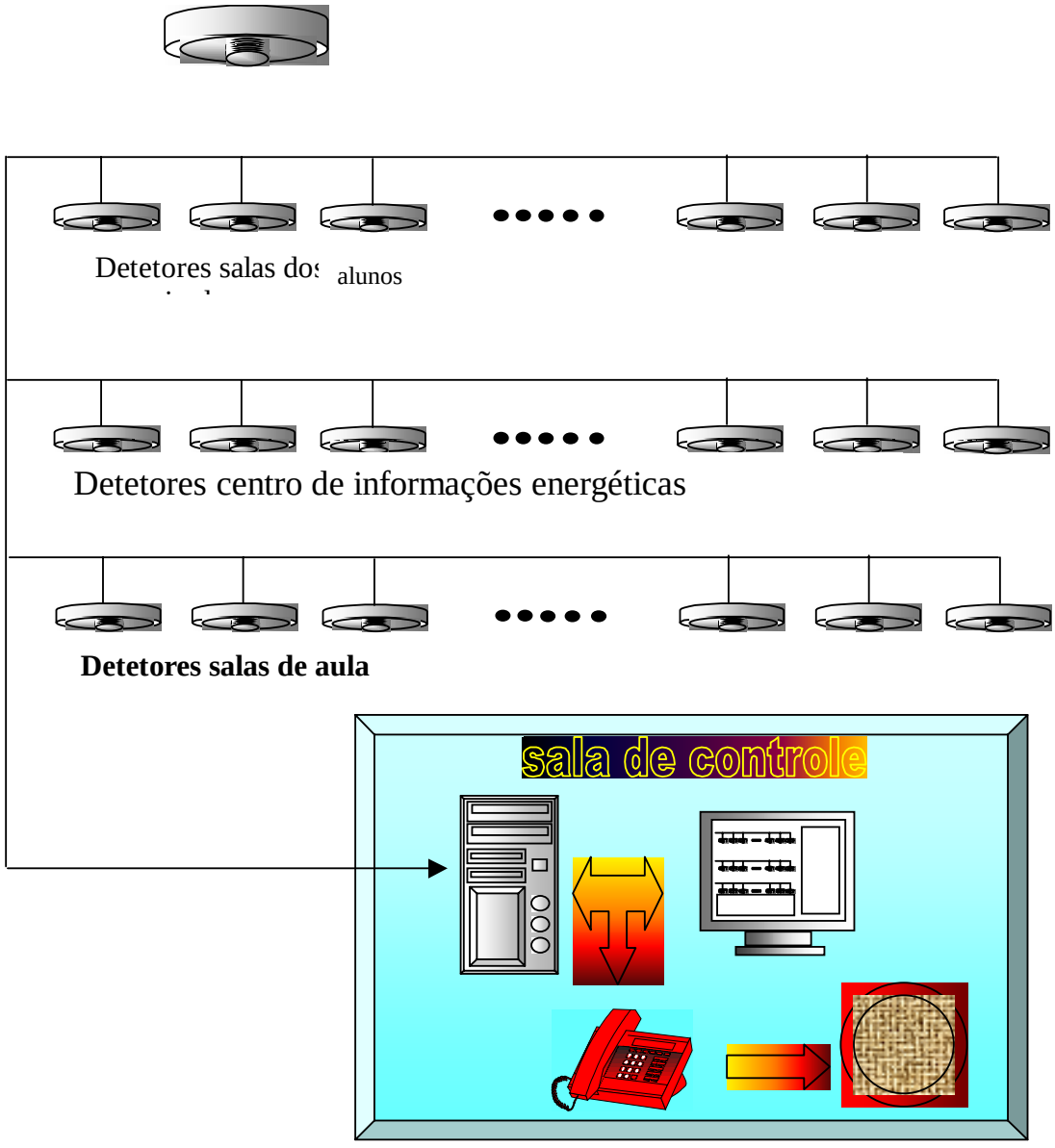


Fig. A.17 Sistema de detetores de incêndio

GRUPO 5 : ENSINO E DIVULGAÇÃO

5.1) Criação do Centro de Estudos de Energia Aplicada ao Setor de Construção e meio-ambiente –batizado de **EMA XXI**

GRUPO 6 : CONSTRUÇÕES COMPLEMENTARES

6.1) Construção de oficina de suporte ao projeto e montagem da sala de controle e segurança predial.

GRUPO 7: SISTEMAS DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Levantamento detalhado do sistema de aquisição de dados a ser instalado, para monitoramento de todas as variáveis necessárias ao nosso estudo – executado pelo colaborador **Gianfranco M. Polga**.

7.1) INTRODUÇÃO

Com o uso intensivo de computadores pessoais para pesquisa de laboratório, controle industrial, testes e medições, é indispensável que o sistema de aquisição seja compatível com estes computadores.

O sistema de aquisição é basicamente constituído pelos seguintes elementos:

- Transdutor
  - Transmissores de Sinais
  - Placa de Aquisição e Controle
  - Software
  - Computador Pessoal

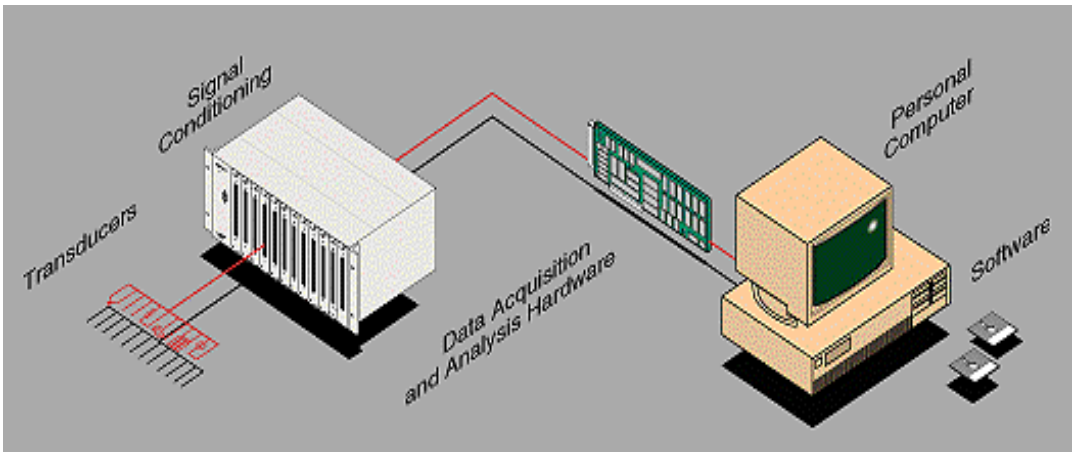


Fig.A.18 Esquema do sistema de aquisição

7.2) TRANSDUTORES

O transdutor transforma um fenômeno físico em um sinal elétrico que possa ser lido pelo sistema de aquisição. Exemplo Termopar, Strain Gauges, Foto-Diodo e outros.

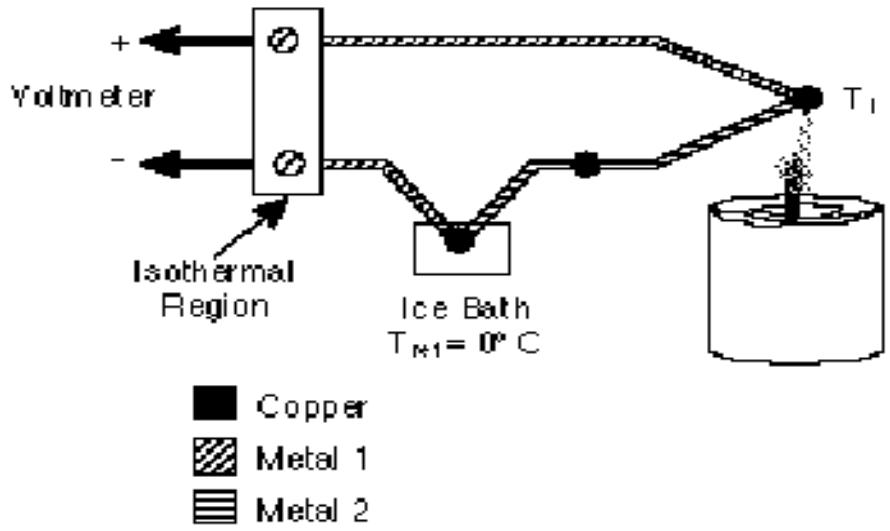


Fig. A.19 Esquema de montagem de um transdutor

7.3) TRANSMISSORES DE SINAIS

O sinal elétrico fornecido pelo transdutor deve ser lapidado para que o sistema de aquisição possa entende-lo.

O transmissor de sinal pode amplificar, isolar e filtrar o sinal, melhorando a precisão da medida. Em contrapartida, o transdutor necessita do fornecimento de um sinal em tensão ou corrente que sofrerá alteração de acordo com o propósito da medida a ser efetuada . Este sinal é fornecido pelo transmissor.

Amplificação: Tem a função de amplificar sinais de baixo nível para incrementar a resolução e “reduzir o ruído”. O sinal amplificado nunca pode ultrapassar o nível máximo de tensão que a placa de aquisição aceita.

Isolação: Tem a função de proteger a placa e o computador de possíveis transientes de alta tensão que causam lhes danos.

Filtro: Tem a função de eliminar sinais que possam prejudicar as medições.

Alimentação: Tem a função de fornecer um sinal de tensão ou corrente em que o transdutor possa trabalhar.

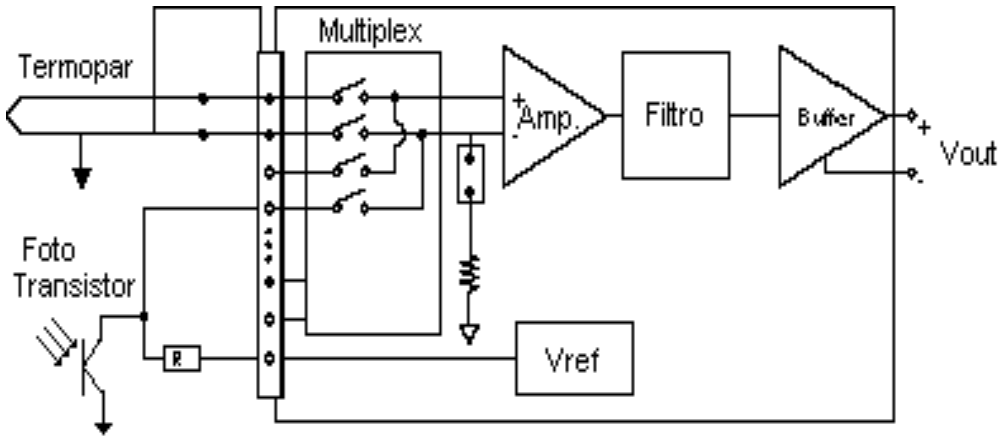


Fig. A.20 Diagrama de transmissão do sinal

7.4) PLACA DE AQUISIÇÃO E CONTROLE

A placa converte,controla e gerencia a interface entre o condicionador e o computador . Transformando medidas e comandos em sinais que sejam compreendidos tanto por um ou por outro.

A placa é constituída pelos seguintes elementos:

- Multiplex - Gerencia um ou mais canais de entrada ou saída de sinais analógicos.
  - A/D ou D/A - Converte sinais analógicos em digitais ou vice-versa.
  - I/O Digital - Portas de entrada ou saída que trabalham com sinais digitais.
  - Interface de Comunicação - Efetua a troca de dados ou comandos entra a placa e o computador.

MULTIPLEX.

Multiplex liga várias entradas e saídas analógicas, através de chaves endereçadas pelo computador, ao conversor A/D e D/A, reduzindo o custo de urtilização de vários conversores, pois estes geralmente têm alto custo.

A/D e D/A.

Os conversores são as peças fundamentais no sistema de aquisição, tendo a responsabilidade de definir a taxa de conversão, a precisão e resolução do sinal convertido.

I/O DIGITAL

Geralmente num sistema de aquisição e controle há necessidade de acionar válvulas, efetuar contagens e monitorar movimento de portas,janelas, válvulas, etc.

INTERFACE DE COMUNICAÇÃO

Interface de Comunicação liga a placa de aquisição e controle ao computador através de suas portas internas e externas. Exemplo: ISA, PCI, PCMCIA, Macintosh NuBus, Serial ou Paralela.

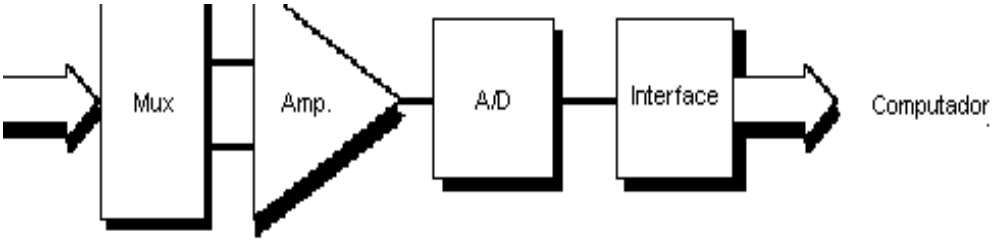


Figura A.21 Diagrama de tratamento do sinal

7.5) SOFTWARE

O software desempenha um papel vital no desenvolvimento do sistema de aquisição e controle. Usa-se no sistema para configurar, controlar e ligar a placa de aquisição e controle ao computador e facilitar a interface do usuário ao sistema de aquisição. Como todos os softwares atuais, eles trabalham com sistemas operacionais gráficos, isto é, sua programação é facilitada por ícones gráficos, diminuindo a necessidade do usuário ser um expert em programação.

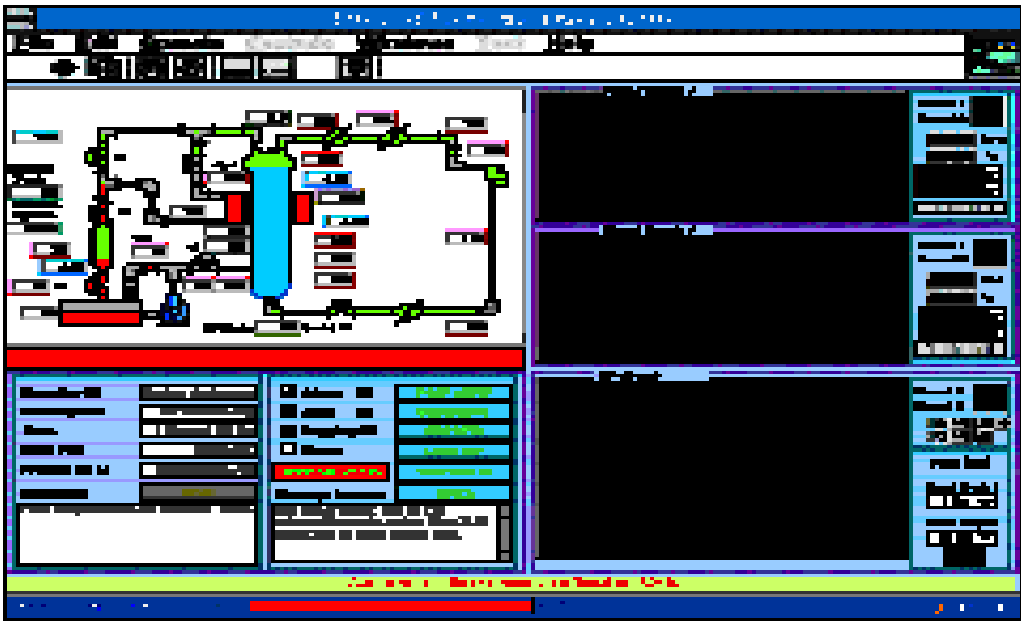


Figura A.22 Tela típica do programa LABVIEW

.7.6) DESCRIÇÃO DO PROJETO

O projeto de aquisição e controle está vinculado inicialmente ao prédio de uso dos professores de pós-graduação (hoje prédio dos alunos do Programa), podendo mais tarde ser expandido para os outros prédios.

Este sistema será o básico para as outras instalações, diferindo somente no numero de variáveis a serem lidas ou controladas. Seguiu-se um roteiro para delinear o projeto:

ROTEIRO

1) Medidas a serem efetuadas.
2) Características dos transdutores.
3) Característica dos transmissores.
4) O sistema de aquisição.
5) O software.

7.8) MEDIDAS A SEREM EFETUADAS.

A) Intensidade luminosa:

Oito pontos distribuídos na parte frontal, lateral e zenital do prédio dos professores do PIPGE e um medidor de leitura móvel.

B) Radiômetros:

Dois pontos, um ponto na face sul e o outro na face norte da casa.

C) Umidade :

Um ponto na interface entra o solo e o ar na parte de baixo da casa.

Dois pontos, um interno e outro externo.

D) Fluxo do ar :

Dois pontos no duto de iluminação zenital.

Um ponto no lado externo da casa.

E) Termometria:

Quatro sensores de radiação.

Quatro sensores tipo bulbo seco.

Quatro sensores tipo bulbo úmido.

Cinco sensores para medida do perfil vertical das salas.

Quatro sensores para medidas externas.

Dois sensores para medidas internas da face norte e sul.

Sensores no sistema de troca de calor na mesa de trabalho -vide projeto do trocador-.

Dois sensores para a temperatura do ar.

Dois sensores para a temperatura da água.

Um sensor colocado no solo a 3 centímetros de profundidade.

Um sensor colocado no solo a 0,5 metro de profundidade no solo.

Um sensor colocado no solo a 1,5 metro de profundidade no solo.

Um sensor colocado no solo a 2,0 metro de profundidade no solo.

Dois sensores no tubo de água, um na entrada do solo e outro na saída do solo.

Dois sensores no piso, um na parte inferior e outro na parte superior.

7.9) CARACTERISTICAS DOS TRANSDUTORES.

Intensidade luminosa: Serão utilizados fotodiodos que trabalhem em todos os comprimentos de onda de luz. Geralmente estes sensores transformam a luz em tensão ou corrente.

Unidade: Lux(Lum/m^2)

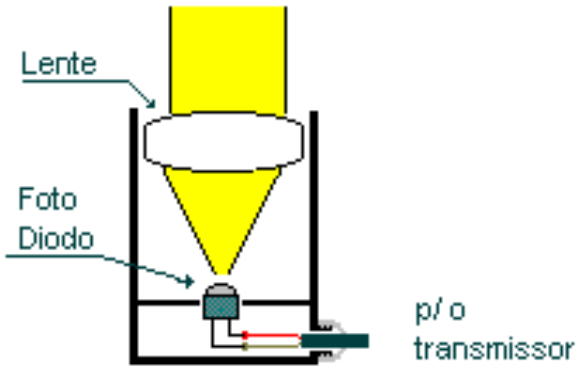


Fig. A.23
Esquema de funcionamento de um fotodiodo

Radiômetros :Utiliza fotodiodos sensíveis a comprimentos de ondas na faixa do Infravermelho e ultravioleta.

Unidade : W/m2

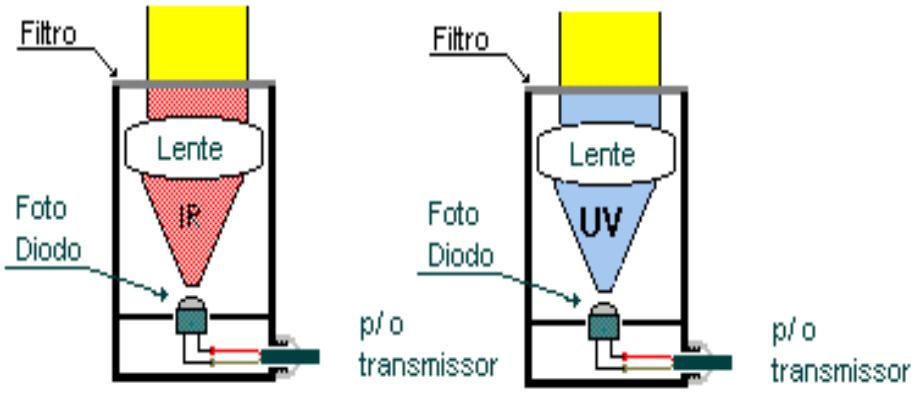


Fig. A.24 Fotodiodos trabalhando na faixa de IR e UV

Umidade : O higrômetro a ser utilizado é um sensor capacitivo de oxido de alumínio. Ao absorver a água, a impedância elétrica do capacitor é alterada de acordo com essa absorção.

Unidade: %UR (Umidade Relativa)

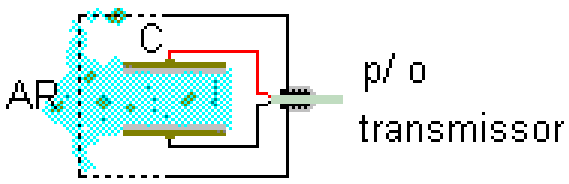


Fig. A.25 Sensor capacitivo funcionando como Higrômetro

Velocidade do ar : Serão usados dois tipos de transdutores, um para medir a velocidade na parte interna da construção e o outro para medir na parte externa.

A velocidade do ar na parte interna é baixa, havendo necessidade de se usar um transdutor especial. Neste anemômetro, a relação entre a resistência elétrica e a temperatura de um fio é usada para monitorar e regular a temperatura de um filamento aquecido exposto ao fluxo de ar. A potência necessária para manter constante a diferença entre a temperatura do ambiente e o filamento pode ser usado para calcular diretamente a velocidade do ar via Equação de King. A equação afirma que a razão do calor perdido é proporcional a diferença da temperatura entre o filamento e o ar, multiplicado pela raiz quadrada da velocidade do ar.

Equação de King : $H=(A + B\sqrt{V_a}).(T_f - T_a)$ (A.1)

Onde:

A e B são constante.

H - Quantidade de Calor

T_f *- Temperatura do Filamento.*

T_a *- Temperatura do Ar*

V_a *- Velocidade do Ar*

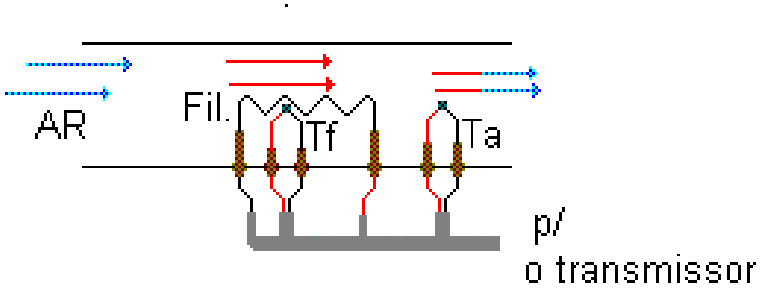


Fig. A.26 Resistências elétricas funcionando como Anemômetro de baixa V_{ar}

Para a medida de velocidade do vento na parte externa deverá ser usada uma turbina que se desloca com a passagem do ar. A velocidade é convertida num sinal de onda quadrada no qual a freqüência é proporcional a esta velocidade.

Unidade: Km/h, m/s, ft/min, mph.

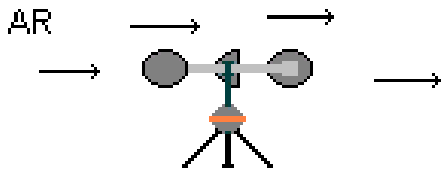


Figura A.27
Anemômetro para v_{Ar} externo

Termometria :Nas medidas da temperatura serão usados vários tipos de sensores e transdutores .

Utilizaremos um corpo negro de área conhecida, acondicionado num recipiente em vácuo, de forma a eliminar os outros meios de transmissão de calor: condução e convecção.

O poder emissivo do corpo negro é proporcional à quarta potência de sua temperatura absoluta (Lei de Stefan-Boltzmann).

$E_{CN}=\sigma T^4$ onde $\sigma=5,7 \times 10^{-8}$ w/m^2.K^4 (A.2)

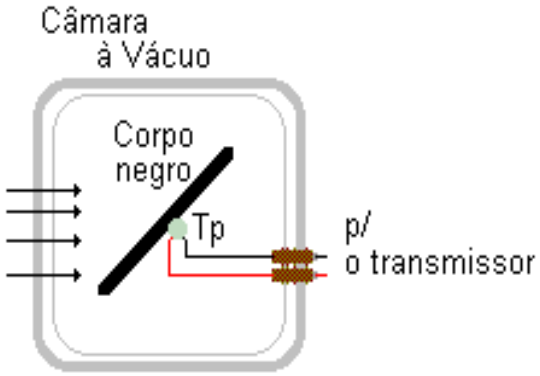


Figura A.28
Termômetro baseado no princípio do corpo negro

A medida por bulbo seco usa o princípio da lei de Boyle-Charles, isto é: a pressão de um gás é proporcional à temperatura, se mantivermos constante o volume do gás.

A medida por bulbo úmido é baseada na expansão volumétrica, onde a expansão é proporcional ao volume inicial e à variação da temperatura.

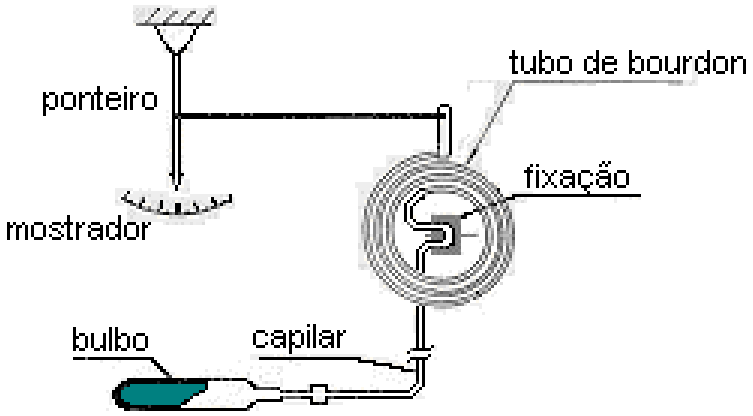


figura. A.29
Termômetro de bulbo úmido

Não foi encontrado no mercado um medidor de bulbo seco ou úmido que possa ser ligado a um sistema de aquisição, já que os medidores geralmente são mecânicos - necessitam serem lidos e os seus valores anotados-, daí a necessidade de se construir um medidor que efetue esta ligação com o sistema.

As outras medidas irão utilizar termistores, termômetros de resistência e componentes especiais.

O termistor é um dispositivo semicondutor de eletricidade cuja resistência diminui com o aumento da temperatura, enquanto nos metais puros a resistência aumenta proporcionalmente à temperatura.

Geralmente os termistores são óxidos de metais, como cobalto, níquel, manganês e outros.

A resistência elétrica de um fio de um metal puro varia proporcionalmente com a temperatura. A relação é:

$R_2=R_1 \times (1 + A \times \Delta t)$

onde A é o coeficiente de temperatura do material a ser usado.

Por outro lado, sabemos pela lei de Ohm (U=IxR) que, se mantivermos a diferença de potencial constante na resistência e variarmos a resistência (que é em função da temperatura) a intensidade de corrente variará inversamente com a resistência.

No nosso caso, os termômetros a resistência elétrica (RTD) são mais adequados para medir variação de temperatura ambiente .

Alguns RTD tem a precisão de 0,01Ω (0,062 ^{o}C) a 0^{o}C.São extremamente estáveis, tendo uma perda de 0,1^{o}C/ano e em alguns modelos é de 0,0025^{o}C/ano.

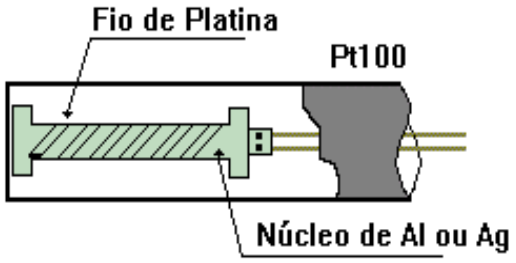


Figura A.30 Termômetro a resistência elétrica (RTD)

7.10) CARACTERÍSTICA DOS TRANSMISSORES

Intensidade luminosa e *Radiômetros*

Os fotodiodos são polarizados inversamente, fornecendo uma corrente nula no amplificador. Ao ser exposto à luz, surge uma baixa corrente proporcional. Ao passar pelo amplificador a corrente sofre um determinado ganho, fornecendo na saída uma corrente de 4mA à 20mA.O valor da corrente de saída é padrão para todos os sistemas de aquisição.

Umidade

O sensor de umidade altera sua capacitância de acordo com a quantidade de água absorvida. Esta capacitância é medida através de um medidor de impedância. A impedância altera a corrente que passa pelo amplificador fornecendo uma corrente de saída padrão.

Velocidade do ar

A eletrônica do anemômetro à fio quente mantém a temperatura do filamento constante através de um sensor de temperatura associado a um amplificador que controla a corrente que passa por ele. O outro sensor de temperatura, colocado numa certa distância, fornecerá a temperatura do ar após o filamento. Os dois sinais são comparados e a diferença, elevada ao quadrado, indica a velocidade do ar. Como no caso anterior, a saída é padrão.

Devido ao movimento do ar, o anemômetro a turbina sofre um deslocamento, que gera uma freqüência. A freqüência, proporcional à velocidade, é convertida em tensão e depois em corrente de saída de 4mA á 20mA.

Termometria

Os transmissores de temperatura transformam a variável medida (proporcional à temperatura) em sinais elétricos. Podem ser classificados em dois grupos: transmissor inteligente e analógico.

Os transmissores inteligentes são construídos utilizando microprocessadores que gerenciam varias funções não encontradas no transmissor comum. Uma delas é a comunicação com outras unidades remotas ou com o sistema de aquisição, realizada através de comunicações padrões (RS232, RS485, etc.).

Com relação à alimentação,os transmissores analógicos são encontrados com dois, três e quatro fios.

Nos transmissores a quatro fios há dois fios para alimentação e dois para o sinal, eventualmente isolados.

Nos transmissores a três fios, há um fio comum, outro para alimentação e o terceiro para o sinal elétrico proporcional à variável de medida.

Nos transmissores a dois fios, a alimentação e o sinal compartilham do mesmo par de fios. A temperatura é transmitida pela variação do consumo do transmissor, modulando-se a corrente, tipicamente, na faixa de 4 a 20mA. Os transmissores a dois fios têm sido utilizados em processos industriais para acoplar os sensores aos instrumentos de medida e

controle, desde da década de 60. Sua evolução ao longo do tempo minimizou problemas causados por flutuações da alimentação, ruído do terra e interferência eletromagnética.

Deverá ser utilizado o transmissor de 2 fios por causa das características de qualidade do sinal .

7.11) SISTEMA DE AQUISIÇÃO

Sistema de aquisição para no mínimo 64 pontos de leitura analógica, tendo a facilidade de expandir o numero de leituras. Os amplificadores de entradas devem trabalhar com níveis de sinais na faixa de 4mA à 20mA, 0 à 10 Volts e ±10 Volts.

Os conversores A/D serão de 12 Bits, fornecendo um precisão de 3,91μA, 2,44mV e 4,88mV, respectivamente aos sinais de entrada. Não existe a necessidade do tempo de conversão seja rápido, já que as variações de sinais são lentas. Como deverão ser utilizados sensores de presença, válvulas e equipamentos que operam com sinais digitais , há a possibilidade de acrescentar estas variáveis ao sistema.

A comunicação entre o sistema e o computador deve ser serial, usando as interfaces de comunicação padrão, isto é, RS232 e/ou RS485.

Após levantamento entre os tipos de equipamentos existentes, foi escolhido o equipamento denominado SCXI fabricado pela National Instruments. O sistema SCXI consiste de módulos de condicionamento de sinal, aquisição de dados e de comunicação acondicionados num rack. Os módulos de condicionamento podem ser escolhidos entre os de entrada ou de saída de sinal analógico, entrada ou saída de sinais digitais .

O rack suporta 12 módulos e já vem com alimentação. Ao utilizar o módulo de comunicação RS485 o numero de racks deverá ser de 31, elevando o total de módulos possíveis para 310 . Cada rack deve ter dois slots, ocupados pelo módulo de aquisição e comunicação.

Existem 14 tipos de módulos de condicionamentos possíveis de serem usados.

1. SCXI-1100 : Amplificador de 32 canais, sinal de entrada de tensão ou corrente e um ganho de 1 à 2000.
2. SCXI-1102 : Amplificador de 32 canais, sinal de entrada de tensão ou corrente, ganho de 1 à 100 (aceita termopar).

3. SCXI-1120 : Amplificador de 8 canais isolados, sinal de entrada de tensão ou corrente, ganho de 1 à 2000 (aceita sinal de ±250 Volts e termopar).
4. SCXI-1121 : Amplificador de 4 canais isolados, sinal de entrada de tensão ou corrente, ganho de 1 à 2000 (aceita sinal de ±250 Volts e termopar e 4 fontes de tensão ou corrente para alimentar transdutores).
5. SCXI-1122 : Amplificador de 16 canais isolados, sinal de entrada de tensão ou corrente, ganho de 1 à 2000, módulo especifico para utilizar com transdutores.
6. SCXI-1140 : Amplificador de 8 canais, sinal de entrada de tensão, ganho 1 à 500 e utiliza aquisição sample-hold.
7. SCXI-1141 : Amplificador de 8 canais, sinal de entrada de tensão, ganho 1 à 100 (utiliza um filtro passa baixa programável).
8. SCXI-1124 : 6 canais de saída analógica
9. SCXI-1160 : 16 canais de saída utilizando relês (2A/250Vac ou 30Vdc)
10. SCXI-1161 : 8 canais de saída utilizando relês (8A/125Vac, 6A/250Vac e 5A/30Vdc)
11. SCXI-1162 : 32 canais de entrada digital(TTL e CMOS)
12. SCXI-1162HV : 32 canais de entrada digital(TTL, CMOS e 240 Vac/Vdc)
13. SCXI-1163. : 32 canais de saída digital(TTL e CMOS)
14. SCXI-1163R : 32 canais de saída digital(Relê)

Todos os racks devem utilizar o módulo SCXI-1200 que contém:
4 canais diferenciais de entrada analógica, com as características:

- Conversor de 12 Bits.
- Ganho de 1 à 100
- Sinal de entrada 0 a 10 Volts ou ±5 Volts
- 2 canais de saída analógica
- 24 canais de entrada ou saída digital.
- Contador e timer.

O módulo SCXI-1200 é responsável pela conversão dos dados e controla os módulos instalados no mesmo rack. Junto com o SCXI-1200 deverá ser instalado o módulo SCXI-2400, responsável pela comunicação entre o sistema e o computador.

O SCXI-2400 utiliza duas interfaces seriais, RS232 e RS485: O RS232 pode ser ligado em qualquer computador, enquanto que o RS485 necessita um conversor de RS485 para RS232 para liga-lo ao computador.

O RS485 tem a vantagem de ser uma interface de comunicação de multiponto e garantir uma transmissão de dados a longa distância, em torno de 1,2 Km (4.000 ft). Os dados somente serão coletados e armazenados pelo computador conectado ao sistema SCXI.

Para o usuário (pesquisador) ter acesso aos dados será necessário a utilização de uma senha .Com o acesso liberado o pesquisador pode transferir os dados desejados ao seu computador e efetuar suas próprias analises. O computador do pesquisador deverá ser ligado ao computador do sistema de aquisição através de uma rede denominada *rede local* . O protocolo de comunicação da rede local ainda não foi definido, podendo utilizar uma rede já existente no PIPGE. Entretanto, é aconselhável a montagem de uma nova rede. Os computadores dos pesquisadores por sua vez devem estar conectados na rede interna do PIPGE e, através do servidor, o PIPGE se conecta à internet.

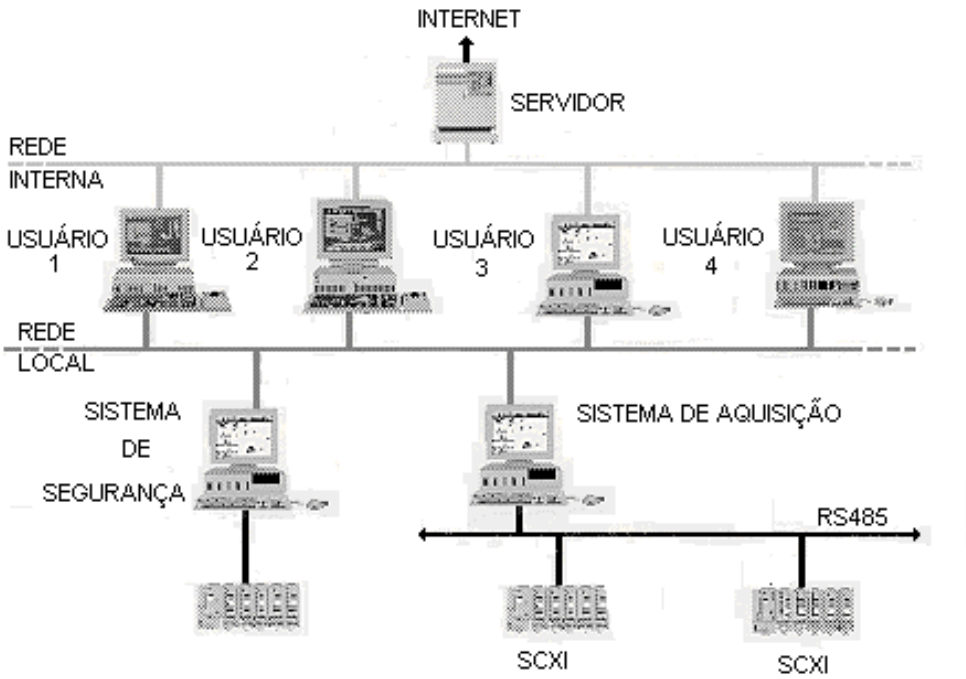


Figura A.31 Rede de aquisição de dados proposta

7.12) O software.

O software representa uma peça fundamental no desenvolvimento de sistema de automação. Para gerenciar o nosso sistema de aquisição foi escolhido o Labview, software fornecido pel National Instruments. Muitos engenheiros, cientistas e técnicos usam o Labview para criar soluções que complementam a necessidade de suas aplicações.

Oferecendo um método de programação onde graficamente você usa objetos chamados Instrumentos Virtuais (Vis), este software proporciona uma flexibilidade de uma linguagem potente de programação sem a dificuldade da mesma. É um método que utiliza diagramas de bloco na sua programação.

Com Labview é possível apresentar os resultados através de um painel gráfico e interativo além de inumeros recursos para o manejo dos dados :

Transferir dados para o disco, compartilhar dados com a rede, -entre aplicações e preparo dos informes-.

Contêm mais de 500 bibliotecas de instrumentos.

Extensa biblioteca de analises para processamento de sinais, estatística, aproximação de curvas e analises complexas.

Comunicação entre os processos e entre redes usando DDE, IAC e TCP/IP.

Disponível em quase todos os sistemas operacionais existentes no mercado.

7.12) Conclusão.

Foi feita uma ampla pesquisa entre fabricantes de sensores, transmissores, aquisição de dados e softwares. Na área de instrumentação há uma ampla diversidade de componentes para automação industrial e limitada na área científica no Brasil. A maioria é de equipamentos manuais e eventualmente ligados ao computador via interface serial RS232, o que limita a quantidade destes produtos que podem ser usados por um mesmo computador.

Procurou-se fazer o sistema mais aberto possível, mesmo que o hardware e software sejam da mesma empresa, utilizando entre o conjunto sensor/transmissor e o sistema de aquisição sinais compatíveis com todos os produtos conhecidos no mercado.

Também, procurou-se tornar o sistema acessível a todos os pesquisadores através de uma rede interna que proporciona segurança e acesso aos dados. Com isso, o pesquisador armazena, analisa e gera um relatório de acordo com suas necessidades, podendo utilizar aplicativos mais adequados aos seus interesses.

Referências específicas da eletrônica e do sistema de controle propostos:

1- Luciano Sighieri, Akiyoshi Nishinari, Controle Automático de Processos Industriais, 2ª Edição, 1985.

2- Douglas M. Considine, Process Instruments and Controls Handbook, 8ª Edição,1987

3- Instrupedia™ 96, Your Interactive Encyclopedia for Instrumentation, CD-ROM, National Instruments, 1996.

4- Instrupedia™ 97, Your Interactive Encyclopedia for Instrumentation, CD-ROM, National Instruments, 1997

5- W. Stephen Woodward, Portable Airspeed Measurement, University of North Carolina, Chapel Hill,1996

6- National Instruments, Measuring Temperature with RTDs-Tutorial, 1996

7- Alexandre Sayar, A Medição de Temperatura nos Anos 90, Instec, 1993.

8- Luís C. M. Gomes, Carlos A. R. da Silva, Mário Sérgio C. da Silva, Sistemas de Medição de Temperatura, Instec, 1991.

9- Juvenal Christov, Marco A. Ribeiro, Gérard Delmée, Instrumentos P/ Medição de Vazão, Instec, 1991.

Apêndice B BOMBAS DE CALOR ACOPLADAS AO SOLO – Uma Revisão -

Uma bomba térmica tem este nome devido a sua habilidade de "bombear" ou mover energia térmica de um lugar para outro. Nada mais é que um dispositivo acionado mecanicamente que absorve energia térmica de baixa qualidade (baixa temperatura) em um determinado local, concentra-a via compressor (alta qualidade ou alta temperatura) e a transfere para outro. Ela não produz energia térmica por si mesmo, mas se houver uma fonte de energia térmica em que esteja conectada, como, por exemplo, uma massa d'água ou o solo, pode mover esta energia para outro lugar (o interior de uma casa, por exemplo).

Bomba de calor é apenas uma outra maneira de se referir aos "Dispositivos de Refrigeração" familiares ao nosso cotidiano, como os condicionadores de ar, refrigeradores, máquinas de sorvete, etc. Estes dispositivos de refrigeração podem aquecer ou refrigerar um determinado ambiente, como se nota no refrigerador doméstico, que refrigera os alimentos em seu interior e passa a energia térmica retirada dos alimentos para a cozinha, através dos dutos posicionados atrás da unidade de refrigeração. Todos os equipamentos de refrigeração (ou Bombas de Calor) produzem refrigeração e aquecimento simultaneamente.

As fontes e/ou depósitos de energia térmica mais comuns, das quais as bombas de calor podem transferir energia são:

O *Ar* em nossa volta

A *Terra* sobre nós

Ou mesmo grandes massas de água

Existem dois tipos de bombas de calor:

Bombas de Calor de ciclo aberto, que realizam trabalho diretamente sobre a fonte de temperatura baixa (ou alta).

Bombas de calor de ciclo fechado, que utilizam fluido de trabalho em um ciclo *Rankine* fechado, com válvulas de expansão. Este fluido de trabalho é chamado "refrigerante" (como os CFC's).

Praticamente todos os sistemas de refrigeração/aquecimento atualmente operam com o princípio de *vapor-compressão (fechados) o,* que significa que a energia térmica a ser removida e transportada de um lado para outro é acompanhado por processos alternados de evaporação e compressão de um fluido conveniente. O estado físico deste refrigerante

(i.e., se está no estado líquido ou de vapor) é imposto por um compressor, que tem a função de variar a pressão deste fluido.

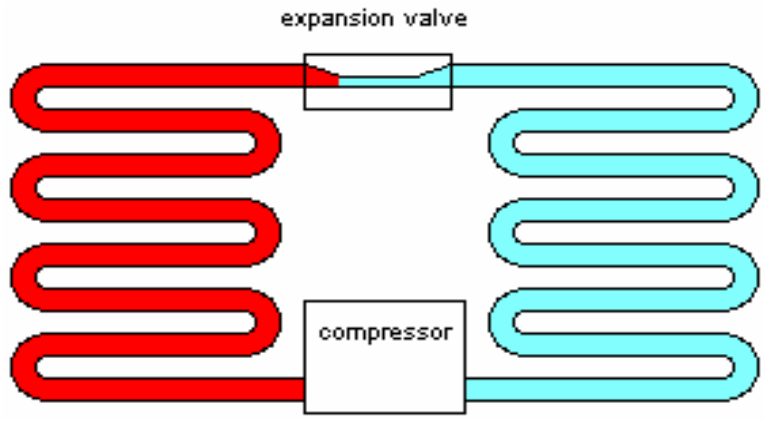


figura B.1 - Esquema genérico de funcionamento de uma bomba de calor - (**HOW-98**)

O ar condicionado para residências, igual aos que são encontrados normalmente no mercado, remove energia térmica de dentro da casa, deslocando-a para o exterior - muitas vezes de um ambiente interno mais frio para o ambiente externo mais quente. O processo de elevação, a partir de baixas temperaturas, para valores por vezes acima de 80^0 C e transferência para outro local envolvem ciclos de expansão, evaporação, compressão, e condensação. O ciclo começa com o líquido refrigerante frio passando através de uma válvula de expansão, vai para o estado gasoso e absorve energia térmica do ambiente. É então pressurizado -através de um compressor elétrico-, onde a temperatura do fluido é elevada, passando para a outra fase, quando o fluido vai do estado de vapor a alta temperatura para líquido a baixa temperatura, à medida que perde energia térmica para outro meio (que pode ser o externo, no caso de refrigeração). Finalmente, a válvula de expansão permite que o fluido frio se expanda novamente e continua o ciclo. Para o sistema funcionar como um aquecedor, basta apenas reverter o ciclo (ou mesmo virar o equipamento).

A geladeira residencial tem o mesmo princípio de funcionamento, com a diferença que a parte fria é envolvida por um invólucro de isolante térmico (o gabinete da geladeira) minimizando a entrada de energia térmica.

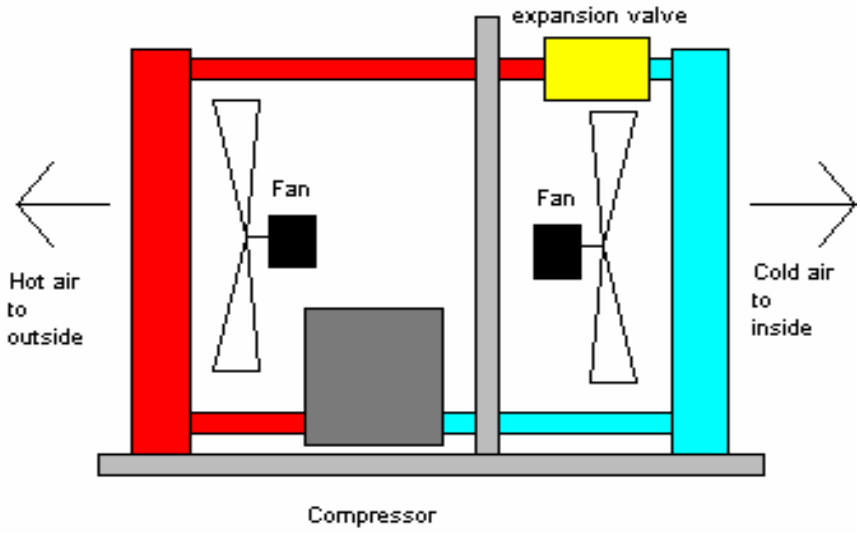


Figura B.2 - Esquema de funcionamento de um aparelho de ar condicionado de parede - (**HOW-98**)

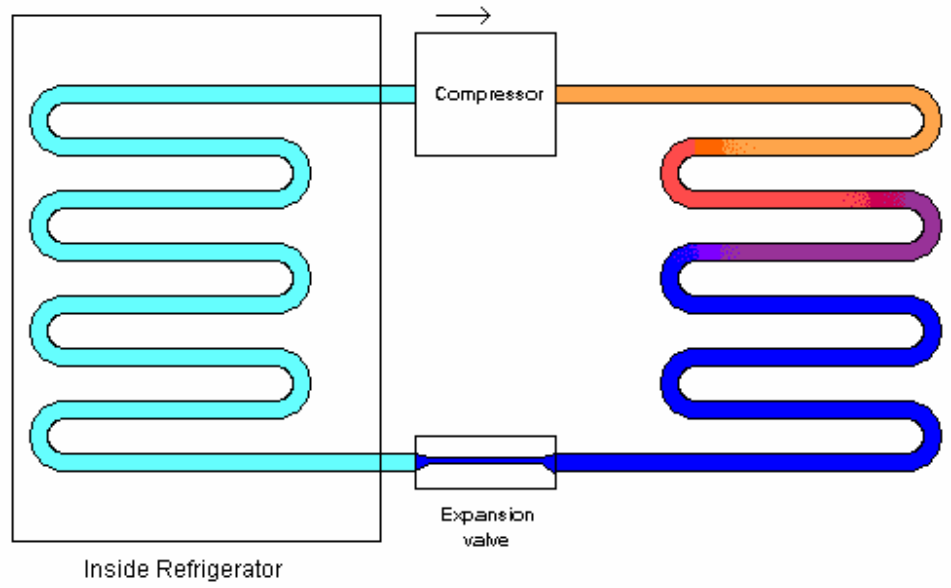


Figura B.3 - A geladeira - esquema de funcionamento - (**HOW-98**)

B.1) BOMBAS DE CALOR ACOPLADAS AO SOLO OU BOMBAS DE CALOR GEOTÉRMICAS

Uma bomba de calor convencional, que faz troca térmica com o ar (air-source heat pump) utiliza o ar ambiente como fonte de energia térmica durante o inverno e como

depósito de energia térmica durante o verão, estando sujeita a grandes variações de temperatura tanto da fonte quanto do depósito de energia, afetando sua eficiência. A pequena capacidade térmica do ar, se comparada a outros veículos –água, por exemplo-, tornam as bombas térmicas ar-ar as menos eficientes entre os diferentes tipos de bombas térmicas hoje disponíveis. A água de um lago ou o próprio subsolo oferecem condições mais favoráveis, uma vez que a temperatura nesta região permanece mais ou menos constante ao longo de todo o ano e a capacidade térmica é muito maior que a do ar. A estabilidade da temperatura do subsolo é utilizada para diminuir as variações sazonais de temperatura ambiente, servindo adequadamente como fonte de energia no inverno e depósito de energia no verão e tornando-se, desta forma, uma importante opção aos métodos convencionais de aquecimento e refrigeração.

Sua natureza dúbia é altamente atrativa em regiões com grandes variações de temperatura - por isto sua disseminação em larga escala nos EUA-. As bombas de calor conectadas ao solo não são idéia nova, com patentes desta tecnologia que datam de 1912 na Suíça. Um dos sistemas de bomba térmica conectada ao solo mais antigos é o do prédio central da “United Iluminating” em New Haven, Connecticut, em operação desde 1930. Embora bem estabelecido na área rural dos EUA, o mercado deste tipo de dispositivo somente agora tem se expandido para aplicações urbanas e comerciais.

A vasta maioria das instalações de bombas de calor geotérmica usa equipamentos que consistem de bombas de calor com troca térmica com a água. Em 1985, apenas 14.000 bombas de calor geotérmicas estavam em operação em edificações residenciais e comerciais nos EUA. Em 1990, saltou para 100.000. Em 1993, segundo a “Air Conditioning and Refrigeration Institute” –ARI-, foram comercializadas outras 17.300. O Departamento de Energia dos EUA (DOE) estima que foram vendidas 40.000 unidades em 1994. A expectativa é que em 2005 os EUA estejam instalando 400.000 unidades/ano, com uma quantidade acumulada de 2 milhões de equipamentos instalados (**ERE-01**).

As expressões "Bomba de Calor com fonte térmica no subsolo "(Ground-Source Heat Pump – GSHP) ou “Bomba de Calor Geotérmica” (Geothermal Heat Pump – GHP) são denominações aplicadas a uma variedade de sistemas que usam o subsolo, a água do subsolo ou água de superfície como fonte e depósito de energia térmica (**ASH-95**).

Existem vários nomes e siglas cunhados em inglês para denominar cada uma destas variações. Além dos termos **GSHP** ou **GHP**, encontramos vários outros:

GCHP - **G**round **C**oupled **H**eat **P**ump

GWHP - **G**roundwater **H**eat **P**ump

SWHP - **S**urface **W**ater **H**eat **P**ump

GS - **G**round **S**ource **S**ystems

Etc.

Apenas como forma de facilitar a nomenclatura, adotaremos a sigla GSHP como sua denominação genérica. Os acoplamentos dos sistemas GSHP com o solo estão divididos em três categorias, cada uma das quais com suas características próprias -que afetam diretamente sua performance e, portanto, o consumo de energia- equipamentos periféricos necessários, custos de instalação e manutenção:

B.2 Sistema fechado (Closed-loop systems)

B.3 Sistema aberto (Open-loop systems)

B.4 Sistema de Expansão direta (Direct expansion systems, ou DX Systems)

A escolha do sistema mais adequado de acoplamento com o solo depende das condições geográficas, espaço disponível, quantidade de aquecimento e/ou refrigeração desejada e custo do ciclo de vida do sistema. Independentemente do sistema, o fluxo energético pode ser esquematizado como segue (fig. B.4), retirado de um caso particular (o sistema DX), mas que é válido para todos os modos.

B.2.1 Sistemas fechados - Linhas Gerais

Os sistemas GSHP fechados consistem de três circuitos fechados: circuito de subsolo; circuito refrigerante e circuito de distribuição de refrigeração/aquecimento. O circuito fechado de subsolo é formado por uma rede subterrânea selada de tubos de plástico (**polietileno** ou **polibutileno** de **alta densidade**) de alta resistência mecânica e boa condutibilidade térmica dispostos horizontalmente em valas (ou trincheiras) ou verticalmente, em furos ou poços. Estes tubos de paredes finas atuam como trocadores de calor, transferindo energia térmica de ou para o meio em que estão imersos. O loop é

preenchido com um fluido circulante que ganha -ou perde- energia térmica ao longo de seu caminho, dependendo da diferença de sua temperatura com o solo circundante. Quando em modo refrigeração do ambiente construído, há aumento da temperatura do fluido circulante, que transfere energia para o meio. Se há demanda por aquecimento, ocorre uma queda de temperatura no fluido e energia é absorvida do meio. Os sistemas fechados utilizam bombas hidráulicas para circular o fluido entre a bomba de calor e o loop. Como o sistema é fechado e selado, não há interação direta com água do meio externo e o trocador de calor da bomba de calor não está sujeito a depósitos de minerais e algas.

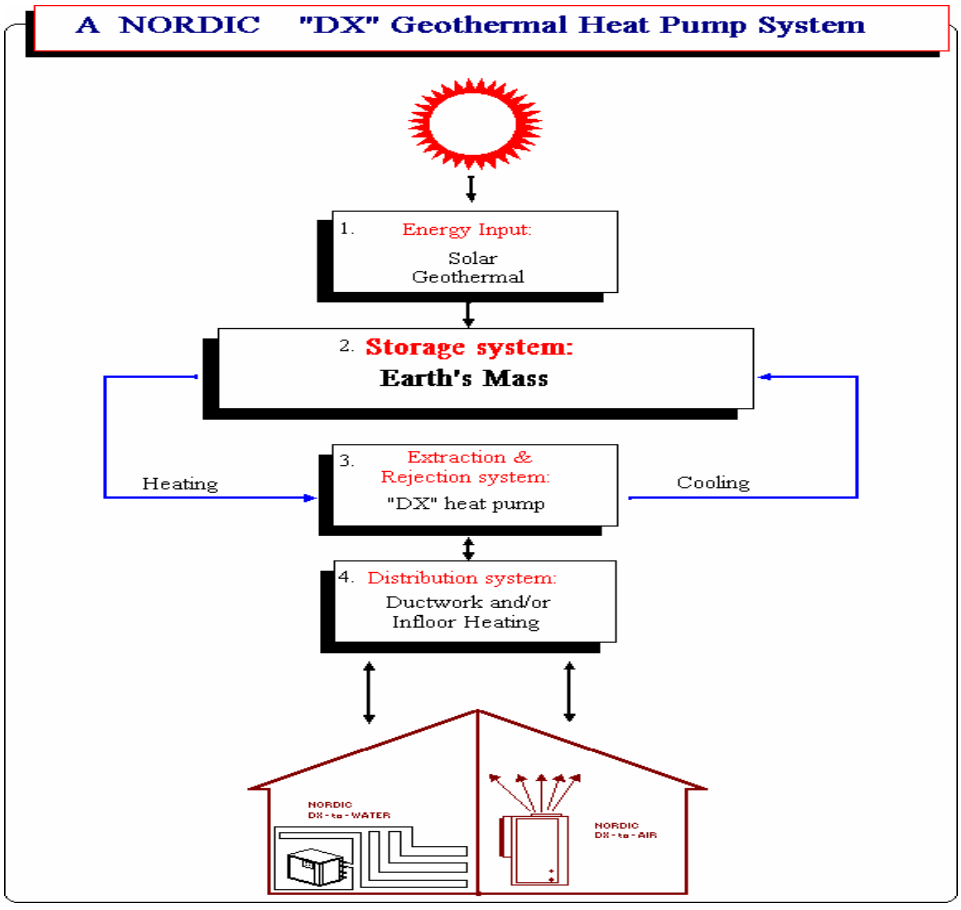
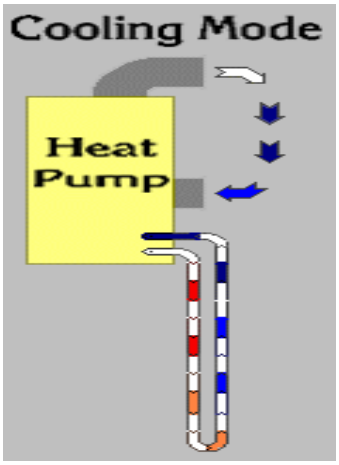
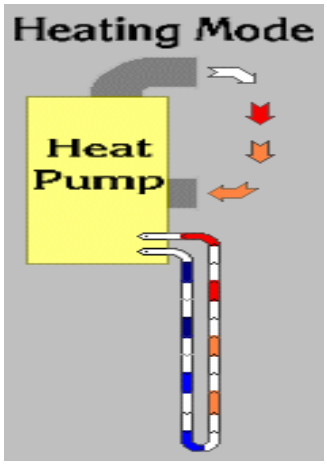


Fig. B.4 fluxo energético genérico de um sistema de bomba de calor geotérmico (**NOR-98**)

O loop refrigerante consiste de tubos de cobre que contém o fluido refrigerante que circula pela bomba de calor, evaporador e condensador; -CFC ou seus derivados. O terceiro

loop consiste de um sistema de ar forçado ou de transporte de água para a distribuição de ar aquecido ou refrigerado através da construção. Nas figuras B.5 e B.6 são mostrados os diagramas de funcionamento dos sistemas fechados de refrigeração e aquecimento.





Figuras B.5 e B.6 diagramas de funcionamento do sistemas nos modos refrigeração e aquecimento (retirado de **SOU-98c**)

A Figura B.7 apresenta um desenho esquemático da bomba de calor no modo aquecimento de ambiente. A válvula reversível permite que se altere o sistema para refrigeração do ambiente. Na figura B.8, é apresentado um desenho esquemático de um sistema completo, com todas as tubulações.

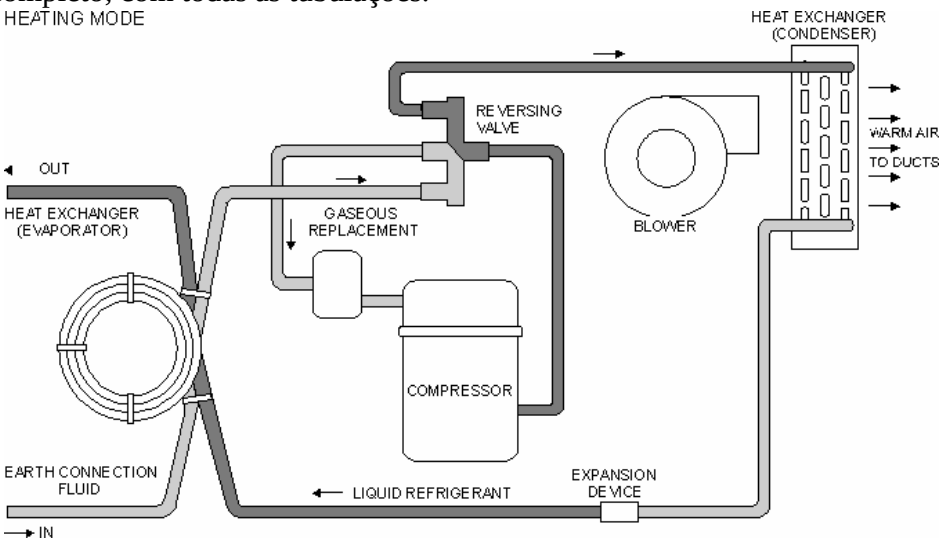


Figura B.7 Esquema do arranjo entre a bomba de calor e os loops associados (retirado de **GEO-98a**)

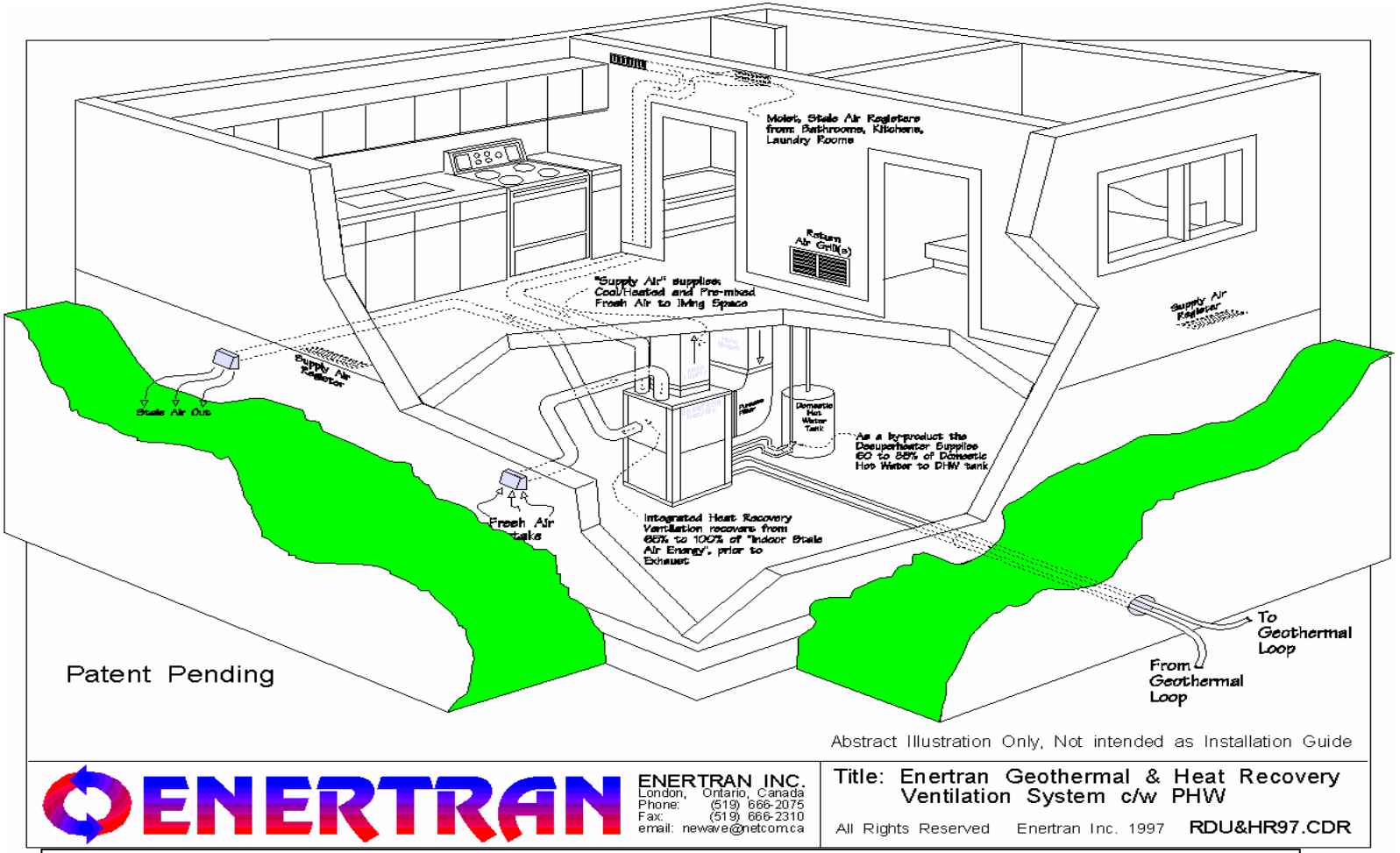

Moist, Stale Air Registers from Bathrooms, Kitchens, Laundry Rooms
Return Air Grill(s)
"Supply Air" supplies Cool/Heated and Pre-mixed Fresh Air to living Space
Supply Air Register
Supply Air Collector
Stale Air Out
Domestic Hot Water Tank
As a by-product the Desuperheater Supplies 60 to 85% of Domestic Hot Water to DHW tank
Fresh Air Intake
Integrated Heat Recovery Ventilation recovers from 65% to 100% of "Indoor Stale Air Energy", prior to Exhaust
To Geothermal Loop
From Geothermal Loop
Patent Pending
Abstract Illustration Only, Not intended as Installation Guide
ENERTRAN
ENERTRAN INC.
London, Ontario, Canada
Phone: (519) 666-2075
Fax: (519) 666-2310
email: newave@netcom.ca
Title: Enertran Geothermal & Heat Recovery Ventilation System c/w PHW
All Rights Reserved Enertran Inc. 1997 RDU&HR97.CDR

Figura B.8 Desenho esquemático de um sistema completo, com as tubulações de ar (ENE-97)

Existe uma grande variedade de configurações do sistema fechado, que podem genericamente ser divididos em três grupos:

B.2.2)Sistemas fechados verticais

B.2.3) Sistemas fechados horizontais

B.2.4) Sistemas fechados em lagos

Figura B.9 Os sistemas geotérmicos fechados utilizam a energia do solo de três maneiras principais: configurações de loop verticais, horizontais e em lagos. **(GEO-98b)**

B.2.2) Sistemas fechados verticais

Os sistemas GSHP verticais consistem geralmente de dois tubos de polietileno de pequeno diâmetro e alta densidade dispostos em furos verticais. Estes tubos são soldados termicamente, no fundo da trincheira, a junções de retorno em forma de "U". (figuras B.10 e B.11). Os diâmetros nominais destes tubos vão de ¾ a 1-1/2 polegadas de diâmetro nominal. A profundidades varia de 18 a 450 metros, dependendo das condições locais de perfuração e dos equipamentos disponíveis (**ASH-95b**). As vantagens dos sistemas GSHP verticais são:

a) Pequena variação das propriedades térmicas e de temperatura do solo a que está em contato
b) Requer pequena área superficial de terra
c) Requer pequeno comprimento de tubo e pouca energia de bombeamento (em comparação com sistemas horizontais)
d) Tem a melhor performance em eficiência entre os sistema disponíveis.

Desvantagem:

Alto custo de implantação e necessidade de mão de obra mais especializada

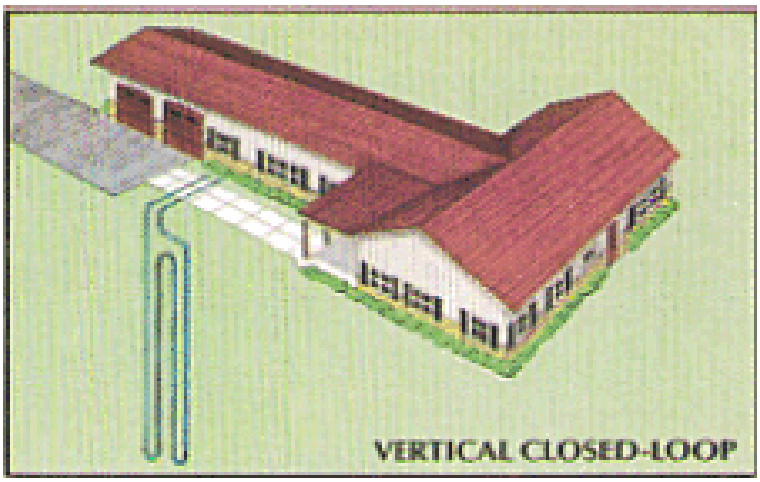


Figura B.10 Arranjo do sistema GSHP fechado vertical (**NEW-98**)

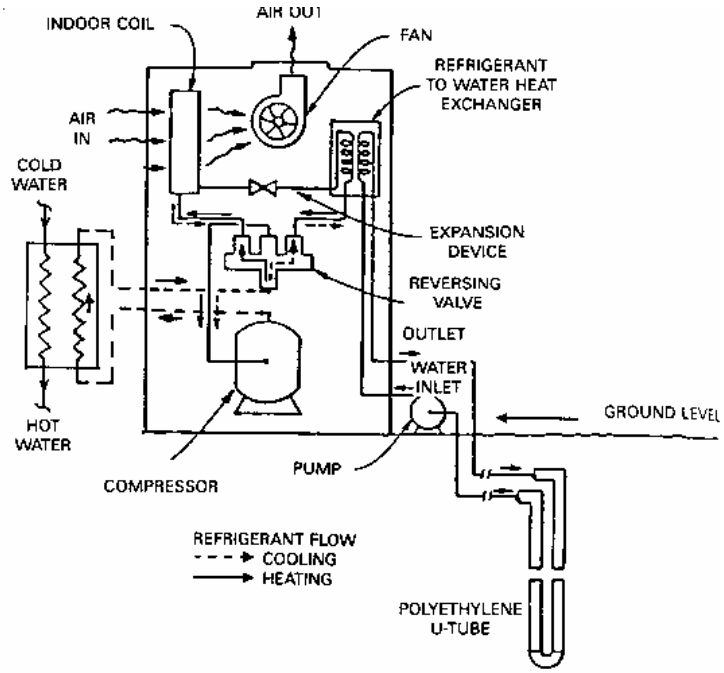


Figura B.11 Sistema vertical de bomba de calor acoplada ao solo

B.2.3) Sistemas fechados horizontais

Os sistemas GSHP fechados horizontais podem ser subdivididos em três subgrupos:

a) Tubo único – Enterrado no solo a uma profundidade mínima de 1,2 metros. Este arranjo requer uma área grande para sua implantação, condição esta difícil de se encontrar nos grandes centros urbanos. (figura B.12).

b)Tubos múltiplos – Usualmente dois a quatro tubos -encontrando-se configurações com mais tubos (figura B.13), colocados em uma única trincheira, reduzindo a área necessária a sua implantação. Com o arranjo de tubos múltiplos e a conseqüente

redução da área necessária, o comprimento total dos tubos deve ser aumentado a fim de reduzir a interferência térmica com os tubos adjacentes.

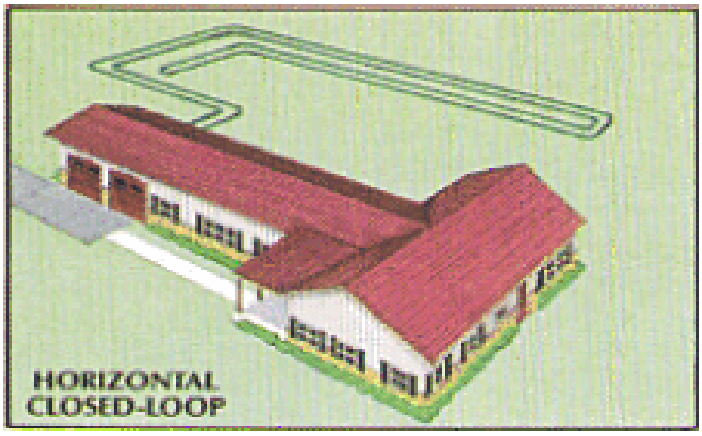


Figura B.12 Arranjo do sistema GSHP fechado horizontal (**NEW-98**)

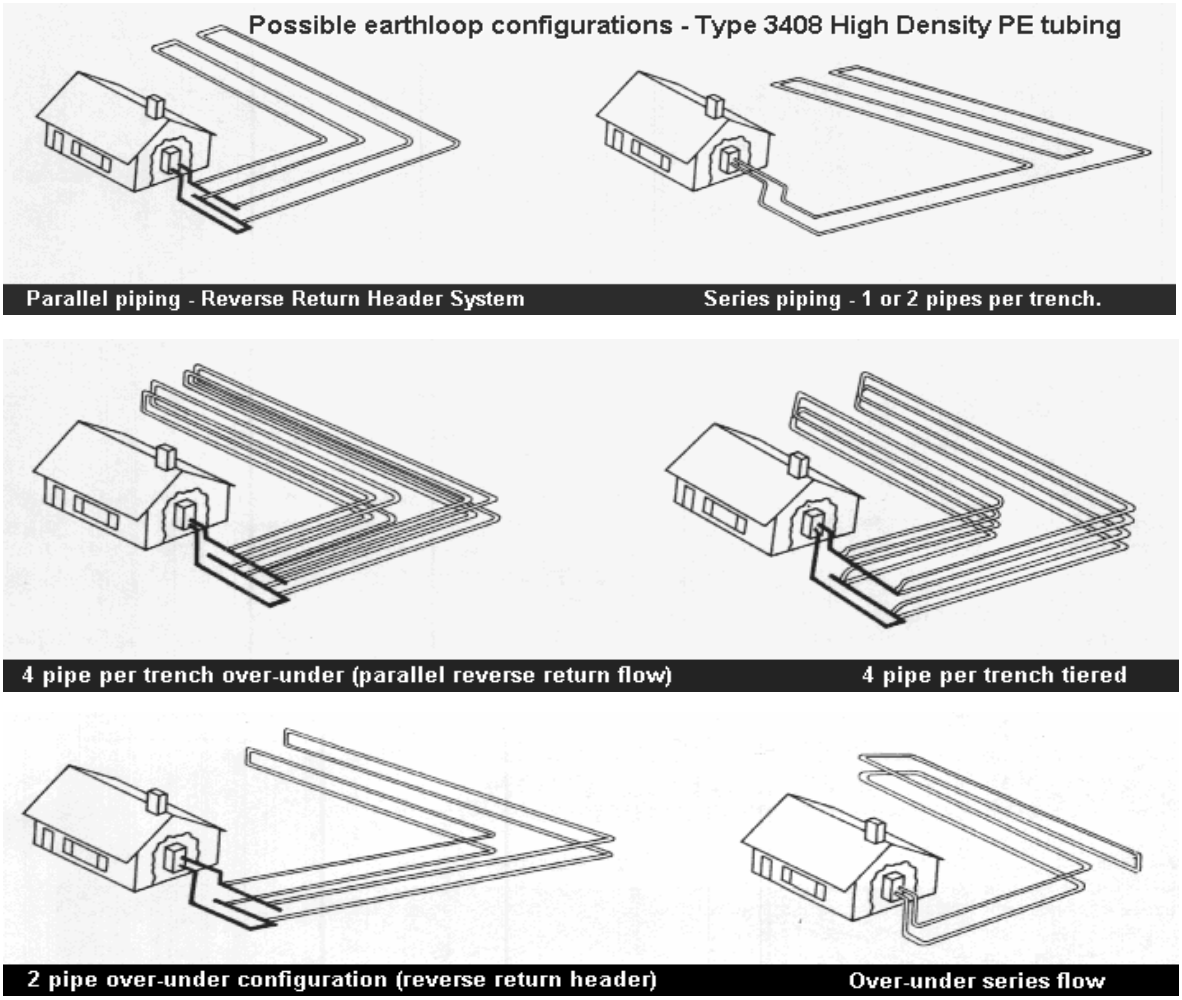

Possible earthloop configurations - Type 3408 High Density PE tubing
Parallel piping - Reverse Return Header System
Series piping - 1 or 2 pipes per trench.
4 pipe per trench over-under (parallel reverse return flow)
4 pipe per trench tiered
2 pipe over-under configuration (reverse return header)
Over-under series flow

Fig. B.13 – Arranjos possíveis de sistema GSHP fechado horizontal múltiplo (**MAR-98b**)

c) Tubos em espiral – Utilizados também para reduzir a área necessária à implantação do sistema. Consiste de um tubo em que se espalham seus loops de forma a posicioná-

los verticalmente, no caso de trincheiras estreitas (figuras B.14 e B.15), ou horizontalmente, no caso de trincheiras suficientemente largas (figura B.16)

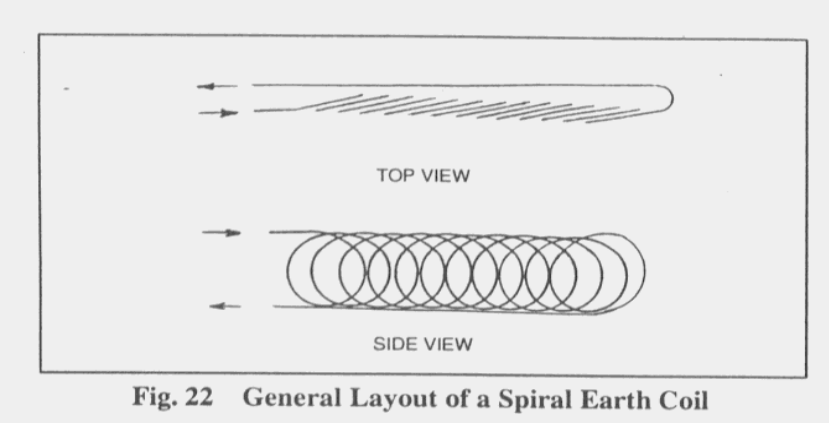
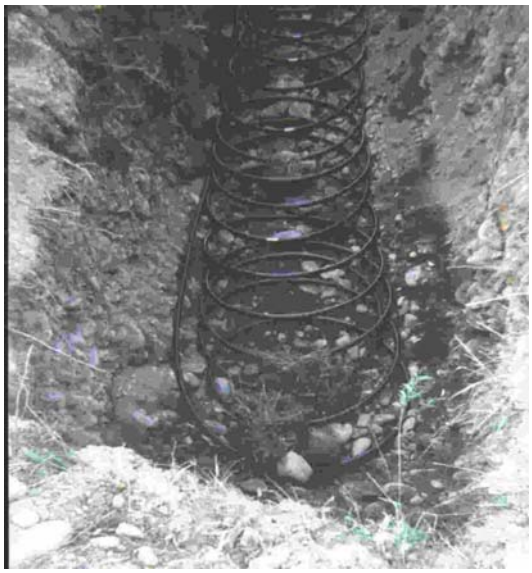


Fig. 22 General Layout of a Spiral Earth Coil

Figura B.14 Visão de topo e lateral do tubo de polietileno em forma espiral vertical (retirado de **ASH-95c**)

Figuras. B.15 – A partir do alto à esquerda,a primeira figura é um enrolamento de tubo de polietileno de alta densidade que será o trocador de calor a ser enterrado no solo. A seguir, medição da profundidade da trincheira -neste caso com 30 metros de comprimento, 15 centímetros de largura e 2 metros de profundidade-; desenrolar do tubo de Polietileno, posicionamento e posterior recobrimento da trincheira com a própria terra deslocada. Costuma-se também recobrir o loop com um concreto magro e depois fazer a cobertura final com terra (retirado de **INT-95**).

Figura B.16 – Loop de polietileno posicionado horizontalmente em trincheira (**INT-98**)



Os custos de instalação deste arranjo são maiores devido ao aumento do tempo gasto nos trabalhos de colocação das espirais e a maior quantidade de tubo, mas podem ser compensados pela área menor de terra necessária à implantação, o que permite seu uso mesmo em lotes residenciais pequenos.

A instalação mais comum de arranjo horizontal utiliza tubos paralelos, ao invés de um único tubo (série), para reduzir as perdas de carga no sistema e, desta forma, reduzir a energia elétrica necessária ao seu funcionamento, -figura B.17 (**ASH-95d**). A escavação para instalação do arranjo horizontal permite a determinação mais fácil das propriedades do solo, pois é mais fácil sua inspeção e coleta de amostras para testes.

Vantagens do sistema horizontal:

a)Custo de escavação menor que no sistema vertical

b)Maior facilidade técnica de perfuração

c)Pequena taxa de transferência de energia térmica de ou para a terra por unidade de área, diminuindo os efeitos residuais da mudança de temperatura do solo ao longo do ano.

Limitações do sistema horizontal:

a)Área mínima necessária é maior que a do arranjo vertical, o que, em alguns casos impossibilita sua implantação

b) Ressecamento do solo, principalmente em longas estiagens, podem reduzir a eficiência de troca térmica do sistema.

c)Pedras ou outros tipos de barreiras podem impedir a escavação da trincheira.

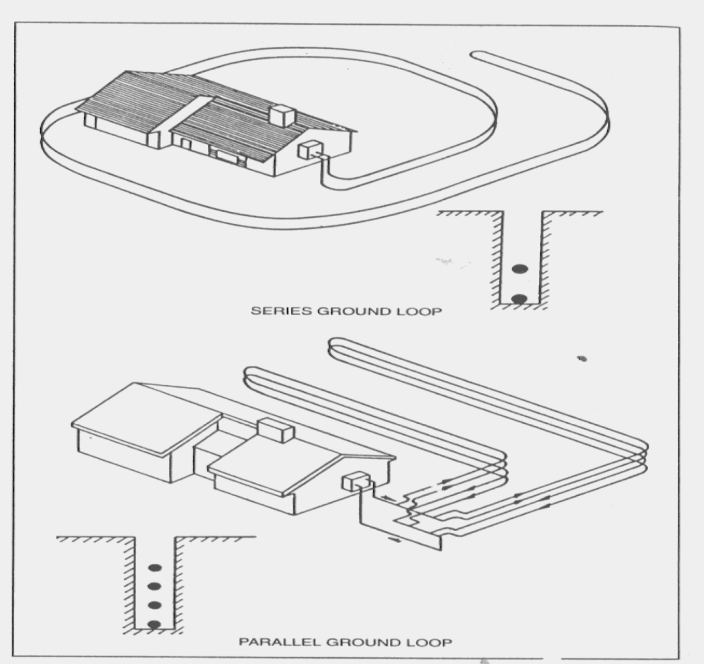


Figura B.17 – Configurações de loops horizontais paralelos e em série

B.2.4) Sistemas Fechados em Lagos

Grandes massas de água, como os lagos, quando utilizados de maneira apropriada, podem ser depósitos e/ou fontes de energia térmica importantes. No caso de refrigeração, pode apresentar a melhor relação custo x benefício. Em sistemas fechados, a bomba de calor água-ar é ligada ao tubo submerso, dentro do qual circula o líquido que faz a troca térmica (sem contato direto da água de circulação com o meio externo). Em lagos profundos, a estratificação térmica fornece um perfil de temperatura favorável à construção de sistemas de refrigeração, uma vez que as temperaturas no fundo são bem mais baixas que na superfície, em alguns casos dispensando inclusive o uso da bomba de calor.

Balanço Energético

Energia Térmica é transferida para a massa de água de um lago de três formas primárias: radiação do sol, convecção do ar ambiente, quando a temperatura do ar é maior que a temperatura da água, e condução a partir da terra. A parte mais significativa dos ganhos energéticos em um lago é devido à radiação solar, responsável por 80 a 90% de toda a energia nele depositada. A evaporação é a principal responsável pelas perdas, seguido pela irradiação para o ambiente, principalmente nas noites de céu limpo -breve discussão sobre os processos de

transferência de calor pode ser vista em **ASH-95e**, ou mais detalhadamente em **PEZ-90-**. No hemisfério norte, a taxa média de ganho de energia térmica devido à radiação solar por metro quadrado de superfície é da ordem de 4 x 10^3 Btu/h.m^2. Considerando-se um lago com superfície de 1 acre (~ 4000 m^2) conectado a um sistema de bomba de calor de 10-ton (120.000 Btu/h): no modo refrigeração, o sistema rejeitará da ordem de 150.000 Btu/h para o lago, ou da ordem de 36 Btu/h m^2, ou aproximadamente 1% dos ganhos com radiação solar. No modo aquecimento, o sistema estará retirando aproximadamente 90.000 Btu/h, ou 23 Btu/h m^2 (ou 50% do que perderia por irradiação para o ambiente , em uma noite de céu claro com 14^0C de diferença entre a $T_{superfície\ do\ lago}$ e $T_{ambiente}$) (**ASH-95f**).

A rede de tubos do sistema fechado de troca térmica acoplado a lago é semelhante ao sistema acoplado ao solo: Tubos de ligação (com diâmetro maior) entre a bomba de calor e o arranjo de espirais mergulhadas na água são utilizados como forma de diminuir sua perda de carga (vide figuras B.18 ;B.19; B.20 e B.21). Para diminuir a interferência térmica entre os loops, pode-se espalhá-los pelo lago. Pode-se também fazer feixes de loops e mergulhá-los ou, numa solução intermediária, loops abertos, como na figura B.20.

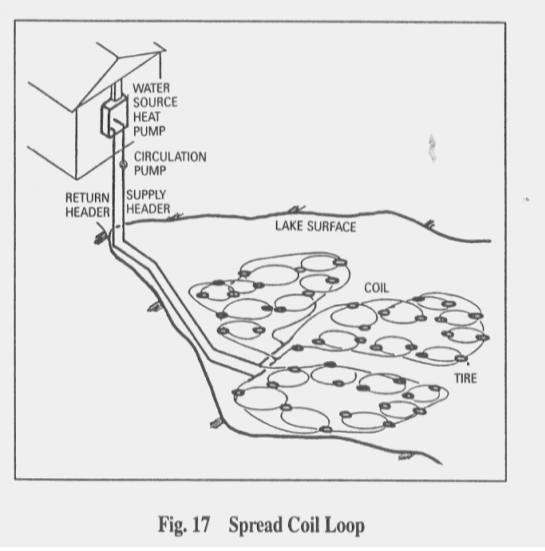


Fig. 17 Spread Coil Loop

Figura B.18 Tubos de polietileno em loops espalhados de forma dispersa pelo fundo do lago (**ASH-95b**)

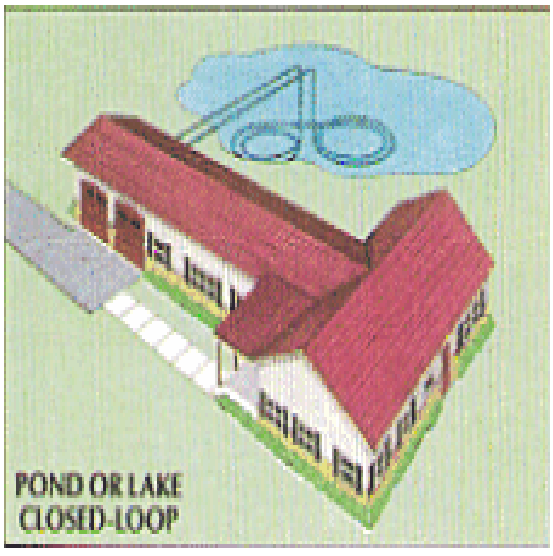


Figura B.19 Loop fechado em feixe duplo no lago (**NEW-98**)

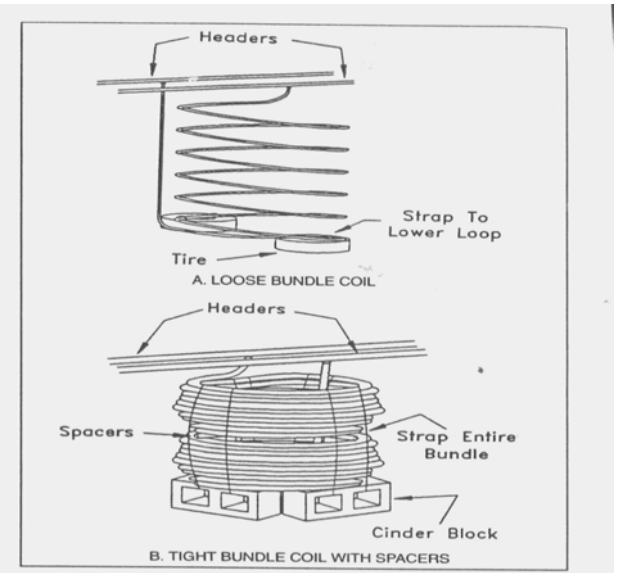


Figura B.20 Arranjo de tubos de polietileno em feixes de loop fechados: passo de rosca aberta e passo de rosca fechada (**ASH-95h)**

Figura B.21 – Foto dos trocadores de calor (em forma de lloop) em um lago antes de seu afundamento (**INT-98**)

B.3)Sistemas Abertos

Os Sistemas de troca térmica abertos utilizam a água local como agente de troca de energia, em contraste com o sistema fechado, que utiliza um líquido intermediário. Na literatura, algumas vezes é chamado de “Ground-Water-Source Heat Pumps”, para diferenciá-los dos sistemas que fazem troca de energia térmica com o solo, chamados de Ground-Source Heat Pumps. Consistem de uma fonte de extração de água, que pode ser um lago, poço artesiano ou mesmo um rio e um sistema de despejo desta água, que pode também ser um lago, rio, poço ou mesmo despejá-la na superfície, desde que haja escoadouro adequado. A água pode ser bombeada diretamente para a bomba de calor água-água (ou água-ar) ou passando por um trocador de calor intermediário conectado à bomba de calor por uma tubulação de

circuito fechado. As figuras B.22; B.23; B.24 e B.25 (**FED-98c**) mostram os possíveis arranjos deste sistema:

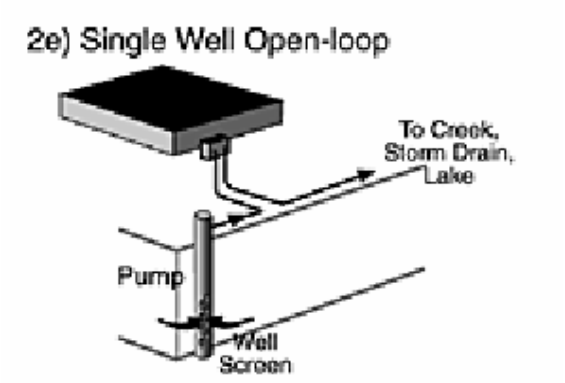


Figura B.22 Sistema aberto com fonte em poço artesiano e descarga em dreno,lago ou rio

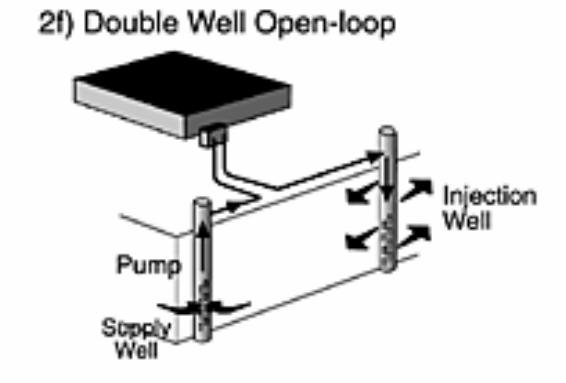


Figura B.23 Sistema aberto com coleta de água em um poço e descarga em outro.

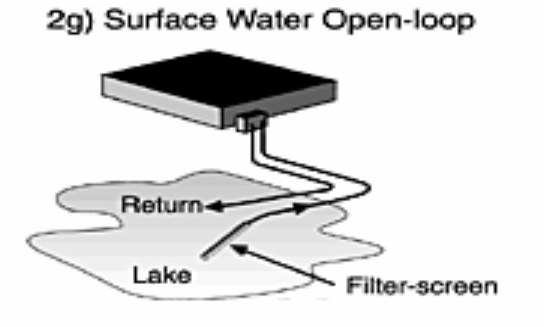


Figura B.24 – Sistema aberto com fonte e rejeito no mesmo lago (**FED-95c**)

Figura B.25 Ilustração de um sistema aberto acoplado a água corrente. Em condições ideais, o sistema aberto é o mais econômico dos sistemas geotérmicos. (**WAT-99**)

Vários fatores devem ser considerados ao se projetar um sistema de troca térmica aberto. Um deles é a qualidade da água, pois o trocador primário entre a água que vem do reservatório e o sistema refrigerante pode tornar-se depósito de sujeira, sofrer entupimento ou corrosão. Outro é a disponibilidade de água suficiente para que o sistema funcione adequadamente – 5,4 a 10,8 litros por minuto por ton. de refrigeração (0.027 a 0.54 litros/s-kw), segundo **FED-95d**. O terceiro fator diz respeito à descarga da água utilizada, que pode estar submetido a limitações devido a possíveis impactos ambientais.

Dependendo de sua configuração, o sistema aberto pode gastar mais energia elétrica para bombeamento que outras configurações de troca térmica com o solo mas,

em condições ideais, pode ter o custo do ciclo de vida mais econômico entre todos os arranjos possíveis.

Rejeito de água

A água que passou pelo circuito aberto e teve sua temperatura mudada, requer um local para ser despejada. Devido ao custo de se construção do poço de retorno, costuma-se despejá-la na superfície ou logo abaixo desta. Entretanto, algumas situações podem não permitir este recurso

a)Rejeito de superfície

É a maneira mais fácil de despejo da água. Pode ser em tanque, lago, rio ou qualquer outra massa de água. Cada escolha tem suas vantagens e desvantagens. Qualquer que seja a forma é necessário requerer permissão das autoridades para colocá-lo em operação. Deve-se garantir que o método escolhido não provoque erosão e/ou sedimentação, descarga de água maior que recarga do aqüífero, etc., causando danos ao ambiente.

A água pode ser despejada numa bacia onde possa infiltrar na terra (de preferência solo arenoso ou de cascalho). Este tipo de rejeito requer grande área disponível. Outra possibilidade é descarregar a água em galerias pluviais, com permissão da prefeitura local (opção remota devido às limitações do sistema de galerias), o que tem a desvantagem de não repor o aqüífero.

b)Rejeito para o subsolo

Retorna-se a água para o aqüífero por injeção em poço vertical, conservando seu volume no subsolo e reduzindo problemas ambientais. Quando é retornada ao mesmo aqüífero, geralmente mantém a mesma qualidade e quantidade de água inicialmente disponível. Pode-se também utilizar drenos horizontais que encaminhem a água para o subsolo.

Como os sistemas de troca térmica alteram a temperatura da água, podem ocorrer algumas mudanças químicas na água reinjetada (por exemplo, mudanças na pressão ou porcentagem de CO_2 dissolvido), podendo causar precipitação de minerais, com o conseqüente entupimento do sistema. A aeração da água pode aumentar a oxidação do ferro nela dissolvido; sedimentos em suspensão também podem causar entupimentos.

Um poço usado para suprimento e descarga de água é chamado de ***Sistema Turbulento***: a água é trazida do fundo do poço através de uma bomba submersa, localizada próxima ao fundo. Através da tubulação, passa pela bomba de calor e é

reinjetada na parte superior do poço, onde irá resfriar ou aquecer, dependendo do uso que se tenha feito dela. A descarga deve ser feita adequadamente, para permitir que a água atinja a temperatura ambiente antes de ser reintroduzida no sistema (estabilizando-se termicamente). Nos EUA, a estimativa de troca térmica é de que, a cada 33 metros de poço, se consiga uma tonelada de refrigeração.

Maiores detalhes sobre o sistema aberto, cuidados na construção do poço, bombeamento, problemas ambientais, etc. podem ser consultados em **GRO-98**.

Um resumo dos prós e contra na instalação do sistema aberto seria:

Vantagens: Projeto simples; requer menos perfurações do solo que o sistema fechado, possibilidade de obtenção de maior eficiência termodinâmica, uma vez que a água que chega à bomba de calor está à temperatura do solo, enquanto no sistema fechado o fluido circulante está em uma temperatura intermediária entre o solo e o ambiente construído. Pode ser combinado com suprimento de água potável e/ou irrigação.

Desvantagens: Sujeito a legislação local, estadual e federal referentes a uso de recursos hídricos; necessidade de grande fluxo de água, trocadores de calor sujeitos a depósito de impureza, agentes corrosivos, entupimentos, ataque por bactérias. Tipicamente é o arranjo que requer maior energia mecânica para bombeamento, tornando-se muito grande se a bomba é superdimensionada ou não tem controle adequado. Caso seja necessária a reinjeção de água, os custos também aumentam.

B.4) Sistemas de Expansão Direta

Cada um dos sistemas conectados ao solo descritos anteriormente utiliza um fluido de transferência de energia entre o solo e o refrigerante. O uso de um fluido intermediário requer uma compressão maior na bomba de calor para obter diferença de temperatura adequada ao funcionamento da cadeia de troca térmica (refrigerante$\rightarrow$fluido$\rightarrow$terra). Requer também uma bomba para circulação de água entre a bomba de calor e o acoplamento com a terra. Os sistemas de expansão direta operam da mesma forma que os sistemas fechados, exceto que o loop no subsolo e o loop refrigerante estão combinados, eliminando a necessidade do fluido intermediário de troca térmica; trocador de calor fluido/refrigerante e bomba de circulação. O loop de troca térmica direta é construído com tubos de cobre (~1/4 de polegada) disposto diretamente no subsolo (vertical ou horizontalmente), embora também se possa utilizar tubos de aço inox ou nylon. O refrigerante (CFC's ou seus derivados) circula diretamente por este tubo, reduzindo significativamente a área de solo necessária à implantação do sistema de troca. No modelo vertical requer de 11 a 16 m^2 de área de

terra por ton de refrigeração (ou 2.6 a 4 m^2/kW) e profundidades médias da trincheira de 2.7 a 3.7 metros. A instalação horizontal típica requer de 49 a 60 m^2 de área de terra por ton de refrigeração (ou 11.9 a 14.5 m^2/kW e 1.5 a 3 metros de profundidade. Embora este arranjo seja extremamente eficiente, apresenta desvantagens que devem ser levadas em conta, como a grande quantidade de gás necessária (em sistemas domésticos, tipicamente 5 a 10 quilos de refrigerante) e a baixa resistência do cobre ao solo ácido, que pode corroê-lo e provocar vazamento do CFC. A energia térmica emanada pelos tubos de cobre pode diminuir a umidade da envoltória de solo, reduzindo a eficiência de troca térmica e, consequentemente, sua performance. O solo arenoso úmido é o mais adequado para o funcionamento deste sistema. Segundo o Federal Technology Alerts (**FED-98**), existe apenas um fabricante americano deste sistema, com modelos que vão desde 24.000 Btu/h até 60.000 Btu/h de capacidade de refrigeração/aquecimento (7 a 17.6 kW). Aplicações de sistemas maiores requerem múltiplas unidades conectadas).

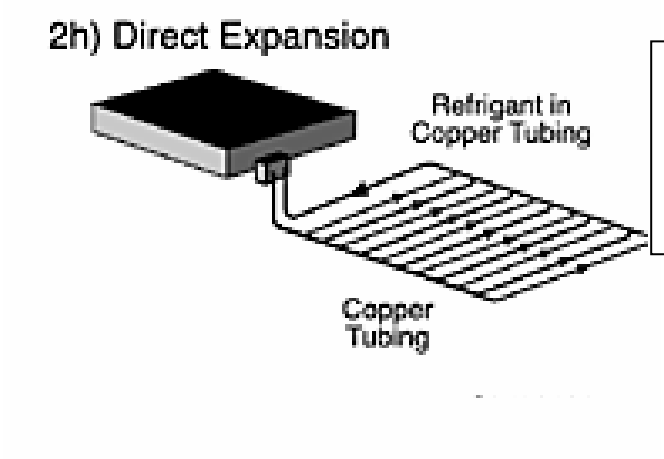


Figura B.26 – Sistema de troca térmica de xpansão diteta no subsolo (**FED-98c**)

B.4) - VARIAÇÕES

O acoplamento com o subsolo é o que diferencia o sistema de bomba de calor geotérmicos dos sistemas tradicionais ar-ar, tendo vasta gama de variações no projeto e instalação, que podem economizar ainda mais energia e reduzir custos de instalação. As mais importantes variações são.

B.4.1) Torre de Refrigeração Suplementar

Onde a refrigeração de ambiente é a principal demanda do sistema, o tamanho do sistema colocado no subsolo pode ser reduzido pela instalação de uma torre de refrigeração. Esta torre é instalada no circuito por meio de um trocador de calor

(chapa trocadora de calor) entre o acoplamento com a terra e a bomba de calor, agindo como um pré-refrigerante do fluido que segue em direção à terra, diminuindo desta forma a carga térmica de refrigeração exigida do subsolo. Um estudo de viabilidade econômica deve ser efetuado para saber se este arranjo concorre para a redução dos custos do sistema geotérmico.

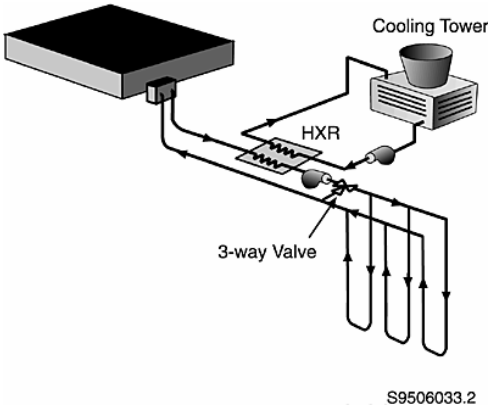


Figura B.27 – Sistema suplementar – Torre de Refrigeração

B.4.2) Conexão com coletor solar

Em climas frios, onde a carga de aquecimento é o principal fator, o sistema de troca de calor geotérmico pode ser conectado a um aquecedor solar para água -diretamente ou por meio de trocadores de calor-. Este painel aumenta a disponibilidade de fluido aquecido, reduzindo a área de solo necessária para o funcionamento adequado do sistema de troca com o solo e elevando sua eficiência.

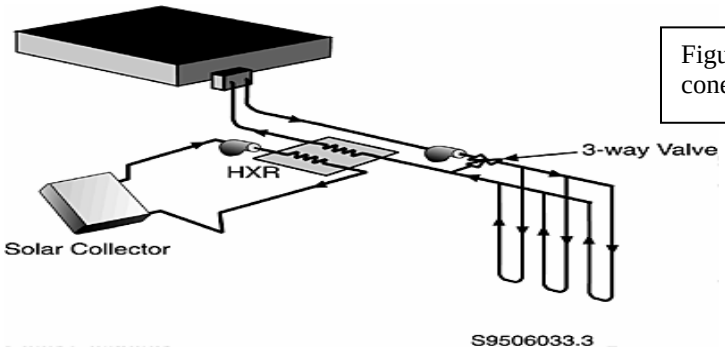


Figura B.28 – Sistema conectado a coletor solar

B.4.3) Extratores de Calor (Desuperheating)

É instalado no circuito refrigerante para aproveitar a energia térmica conduzida pelo gás refrigerante a alta temperatura. Este sistema de recuperação de energia pode suplementar, ou algumas vezes substituir, os sistemas de aquecimento de

água convencionais, principalmente no modo refrigeração, quando a produção de rejeitos é maior.

B.5) DOMÍNIOS DE APLICAÇÃO

A grande maioria dos sistemas geotérmicos utiliza-se de múltiplas unidades de bombas térmicas acopladas com circuito de água, formando conjuntos com a capacidade desejada, muito embora seja possível também a construção de sistemas com grandes bombas de calor a partir de compressores centrífugos de até 19.5 milhões de Btu/h. As unidades individuais, que variam de 1 a 10 tons (alguns chegando a 15 tons), são conectadas a um circuito fechado comum instalado na terra. Sistemas comerciais de grande capacidade podem ser obtidos pelo uso de várias unidades pequenas, cada uma responsável pelo controle de uma zona. Como a capacidade de refrigeração dos sistemas comerciais (instalados em escolas, prédios de escritórios e de apartamentos) são substancialmente maiores que os sistemas residenciais e freqüentemente localizados em regiões de alta densidade de construção, a falta de área geralmente levam à instalação de sistemas verticais fechados. São feitos furos no solo com profundidade de 70 a 100 metros, com um coeficiente aproximado de 42 metros de profundidade por cada tonelada de refrigeração e separação entre estes furos de 3 a 8 metros, dependendo das características de solo e de projeto.

O arranjo horizontal fechado é utilizado apenas em pequenos prédios e quando existe grande área disponível para escavação, como é o caso das residências térreas. O sistema horizontal aberto é pouco utilizado, devido às condições especiais que devem ser cumpridas para sua instalação.

Os sistemas de grande capacidade, em especial os verticais fechados e os sistemas abertos, devem ser precedidos de estudos hidrogeológicos, que incluam:

a) Usos principais da água do subsolo
b) Geologia da área e como será sua inter-relação com os sistemas de troca térmica (instalação e operação)
c) Posição e número de usuários da água do subsolo nas proximidades
d) Se o sistema retirar água, qual a taxa permitida.
e) Observação dos programas governamentais de proteção do lençol freático.

B.6) VANTAGENS DO SISTEMA

B.6.1) Consumo de Energia

O primeiro benefício das bombas de calor geotérmicas é a redução no uso de energia elétrica para condicionamento de ambientes. A área no ambiente construído necessária à sua instalação é consideravelmente menor que os sistemas convencionais, o que na maioria dos casos, dispensa o uso de torres de refrigeração, condensadores a ar, boilers e/ou queimadores, além de reduzir a necessidade de resistências suplementares. Como o sistema é instalado em um ambiente com pequenas variações de temperatura - dentro de uma massa de água ou no subsolo -, não está sujeito a estresses térmicos, o que garante sua durabilidade e baixa manutenção. Além disto, usa menos gás refrigerante que um sistema convencional do mesmo porte.

Em sistemas fechados, o circuito de água é virtualmente livre de manutenção, apenas necessitando de manutenção de rotina nas bombas de circulação, como em qualquer motor ou bomba d'água. A menos que haja algum problema de vazamento, é necessário apenas o monitoramento da temperatura, pressão e fluxo do líquido. Nos sistemas abertos, o poço requer manutenção como em qualquer poço d'água, devendo-se fazer o monitoramento rotineiro da temperatura, pressão e fluxo. O trocador térmico deve sofrer inspeção rotineira, devido à possibilidade de acúmulo de detritos e formação de crostas.

B.6.2) Deslocamento do Pico de Consumo de Energia Elétrica

Os resultados apresentados por Hughes et al. (**HUG-96**) mostram que, além da redução dos picos de consumo de energia elétrica dos sistemas GSHP em relação aos sistemas tradicionais, foi também verificado um deslocamento destes picos em relação ao tempo. Em um dos casos estudados (local 213), verificou-se uma queda no pico de demanda de refrigeração de aproximadamente 50% e um deslocamento deste pico das 19:00h para 20:15h (figura B.29). Em outro local (local 218), verificou-se também uma queda de 50% no pico de consumo para aquecimento, com deslocamento no tempo de 19:45h para 18:15h (fig. 1.35). Embora os picos de consumo de energia para aquecimento durante o inverno ocorram por volta das 6:00h (neste local pesquisado), os resultados preliminares são um bom indicativo do potencial de redução do pico de demanda a ser explorado.

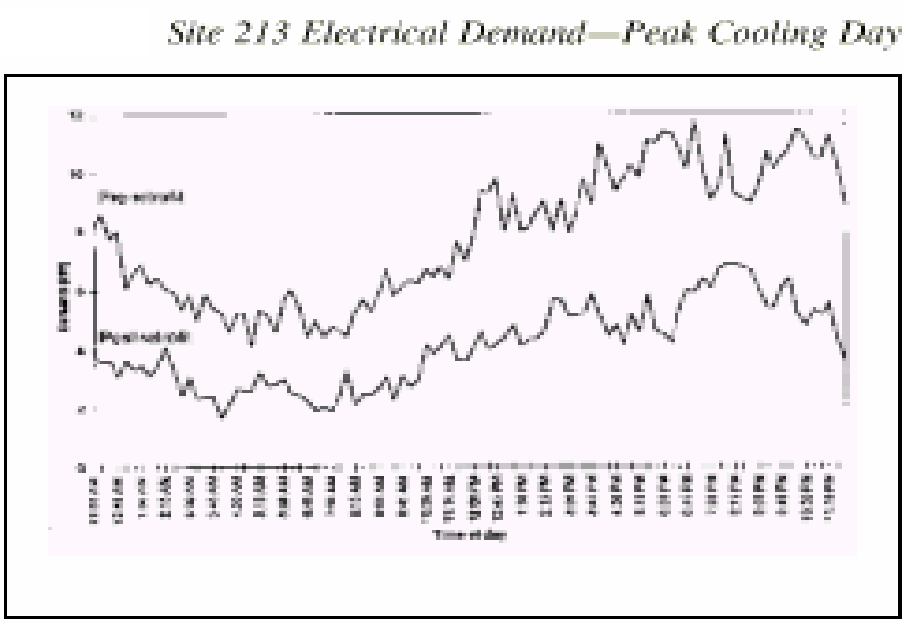


Figura B.29 – Consumo de eletricidade para refrigeração antes e depois da substituição do sistema de condicionamento de ambiente – HUG-96 - nota: foram executadas outras alterações nas construções em estudo: lâmpadas de alta eficiência, melhoria de isolamento do forro, etc..

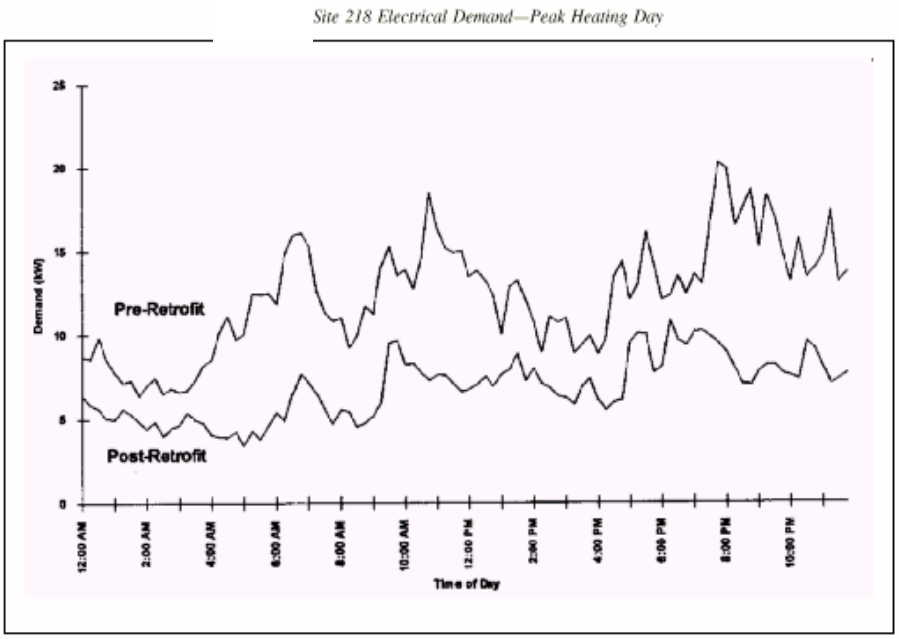


Figura B.30 – Consumo de eletricidade para aquecimento antes e depois da substituição do sistema de condicionamento de ambiente – HUG-96 - nota: foram executadas outras alterações nas construções em estudo: lâmpadas de alta eficiência, melhoria de isolamento do forro, etc..

B.7) IMPACTOS AMBIENTAIS

Em última análise, nossa fonte de energia é o Sol. Petróleo, carvão, gás, biomassa e hidroelétricas são formas de energia derivadas do Sol. Devido à grande massa da Terra, aproximadamente metade da energia solar que chega até o planeta é absorvida e estocada na "geomassa" (**NEI-95**). O uso desta energia não produz rejeitos e não altera morfologicamente as características do solo. Até o momento, não existem impactos ambientais negativos significativos associados às bombas de calor geotérmicas, embora sua instalação possa ser afetada por regulamentos ou códigos de obra locais. A instalação de equipamentos de condicionamento de ambiente mais

eficiente reduz o consumo de eletricidade, com a conseqüente redução de impacto ambiental devido à diminuição da demanda de formação de represas artificiais, redução do consumo de aço, cimento, de rejeitos radiativos -no caso das usinas atômicas- ou de emissão de particulado, óxidos de enxofre, óxidos de nitrogênio e dióxido de carbono -no caso de usinas térmicas a combustível fóssil-.

O eventual aumento -ou diminuição- da temperatura do solo implica em alterações de pequena escala de tempo e geralmente em pequena amplitude. Segundo o manual de GSHP, (**GRO-98)**, as mudanças verificadas na água de retorno são menores que 5^0 C. Como o aumento da temperatura do solo depende da massa de terra/água utilizada como reservatório (ou fonte de calor) e fluxo do fluido, a alteração térmica dependerá do projeto, mas certamente será bem menor que o valor de temperatura registrado na água de retorno. Entretanto, é recomendável o monitoramento de variáveis que são afetadas pela implantação destes sistemas, por exemplo: pH, condutância específica, partículas dissolvidas e temperatura.

No "Richard Stockton College" Pomona, New Jersey, USA **(YOR-00)**, foi realizado um estudo de acompanhamento das mudanças no interior do solo e sua influência sobre os microorganismos a ela adaptados. Há indicação de mudanças no número e tipo de bactérias. A pesquisadora acredita que este comportamento seja apenas de efeito local e que não deva persistir fora do campo de instalação do equipamento de **GSHP** vertical.

Os sistemas horizontais devem ser instalados distantes de esgotos e fossas, evitando eventuais problemas de contaminação do sistema e possível alteração de atividade biológica devido à modificação do comportamento da temperatura próximo ao esgoto. Quanto aos sistemas verticais, é recomendável o isolamento do furo ou do poço com materiais de baixa permeabilidade para evitar a contaminação da água do subsolo pela água da superfície; mistura de aqüíferos pelo fluxo dentro do furo e alteração das características hidráulicas do aqüífero. Isto é possível pela adição de uma barreira impermeável envolvendo os tubos do sistema no subsolo.

B.8) EFICIÊNCIA DO SISTEMA

A comparação de eficiência dos vários sistemas deve ser feita de maneira apropriada, pois podem variar com a aplicação, carga, fonte ou depósito de calor, etc. Nos EUA foram desenvolvidos três padrões aceitos universalmente para teste de eficiência de bombas térmicas, para condições de temperatura e operação específicas.

Obviamente, as classificações obtidas a partir destas normas não necessariamente refletem a eficiência do sistema sob condições de operação sazonais, devendo-se fazer as correções apropriadas aos valores obtidos.:

B.8.1) ARI Standard 320 – Bombas de calor ar-água – Estas normas aplicam-se aos mecanismos de compressão e bombas de calor água-ar residencial, comercial e industrial movidas a eletricidade.

B.8.2) ARI Standard 325 Bombas de calor geotérmicas (Ground Water-Source) – Aplicam-se aos mecanismos de compressão e bombas de calor geotérmicas com fonte de calor a partir de massa de água.

B.8.3) ARI Standard 330 Bombas de Calor Geotérmicas de Sistema Fechado (Ground-Source Closed-Loop Heat Pumps) Aplicam-se aos mecanismos de compressão e bombas de calor geotérmicas com troca térmica ar-água de sistema fechado. O líquido circulante no sistema fechado é uma solução com 15% em peso de HCl + água.

B.9) CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO

Vários parâmetros influem de forma significativa no custo total do sistema: capacidade do equipamento, tipo, refrigerante, sistema de distribuição de ar, sistema de controle, configuração da tubulação, sistema de acoplamento com o solo, etc. Para ilustrar as variações de preço envolvidas no custo de instalação dos sistemas GSHP, são mostrados alguns exemplos de instalações de diversos tipos, tamanhos e usos:

B.9.1) -Stockton State College localizado em Pomona, NJ, onde foi feito um retrofit do sistema que totalizou 1.655 tons (5.826 kW) a um custo total de US$5.246.000 (US$3.170/ton em dólares de 1993). A instalação recebeu incentivos e descontos, reduzindo o capital empregado para US$135.000.

B.9.2) -WaterFurnace, empresa de GSHP, projetou um sistema com loops fechados de polietileno submersos em um lago para um prédio de escritórios localizado em Fort Wayne, Indiana, USA. O sistema totaliza 134 tons (471.7 kW) a um preço declarado de US$239.800, com custo de US$1.790/ton (dólares de 1991)

B.9.3) -Salem Community College localizado em Carney's Point, New Jersey, USA, fez uma substituição (retrofit) do sistema de 160 tons de refrigeração, a um custo de US$284.000 – com um valor médio de $1.775/ton a dólares de 1993.

B.9.4) -Paint Lick Elementary School localizada em Garrard County, Kentucky , USA, instalou um sistema de 123 tons (433 kW) a um custo de 3.090/ton (dólares de 1992)

B.9.5) -Maywood Elementary School localizada em Hammond, Indiana,USA, com 250 tons (880 kW) a um custo total de $1.277.190. O sistema consiste de 74 bombas de calor e 244 tubos verticais acoplados. Custo unitário: US$5.110/ton (dólares de 1994)

B.9.6) Uma estimativa do U.S. Army Corps of Engineers avaliou o custo total de GSHP entre os valores de US$2.000/ton e US$2.450/ton (dólares de 1991). Entretanto, existe uma tendência de queda de custos à medida que a demanda por sistemas cresça e as técnicas de instalação se aprimorem. Esta redução de custos é a meta principal da International Ground-Source Heat Pump Association (**IGSHPA**) e do Geothermal Heat Pump Consortium (**GHPC**).

Como forma de baratear e normatizar o uso dos sistemas de GSHP, o governo americano, via **EPRI** (Electric Power Research Institute - Palo Alto CA) tem publicado o Demand-Side Management (**DSM**) que, em 1993, já contava com 133 programas específicos de incentivo e suporte técnico mantido pelas empresas distribuidoras de energia elétrica. O boletim do **FED-98** já contabilizava 2.321 **DSM** em 666 utilitárias . Os descontos oferecidos por estes programas variam de US$15 a US$600 por tonelada de refrigeração, com uma média de US$ 190/ton. e descontos de US$100 a US$2.000 por unidade de GSHP e média de US$538/unidade. Alem disto, existem operadoras que possuem programas de descontos que não levam em conta o tipo de tecnologia que é empregado, apenas a economia que o sistema proporciona.

B.10) A ECONOMIA

A economia (de energia e financeira) depende das particularidades de cada caso. Em média, nos EUA, os sistemas GSHP têm potencial de redução do consumo de energia no modo refrigeração de 30% a 50%, e no modo aquecimento, de 20% a 40%, quando comparado aos sistemas ar-ar (**FED-98**). Um estudo preparado em 1987 para o **DOE** (U.S. Department of Energy) estima economia de energia dos sistemas de

bombas de calor geotérmicas que vão de 17% a 42%, comparadas com sistemas ar-ar e dependendo da região e do tipo de instalação.

Embora existam várias técnicas para avaliar o consumo anual de energia de um sistema **GSHP**, desde métodos manuais -através de estimativas-, até métodos computacionais, todas elas são baseadas nas normas referidas anteriormente. O "Federal Technology Alerts" (**FED-98**), publicação do US Department of Energy apresenta uma estimativa de consumo de energia dos equipamentos de GSHP através de uma ferramenta analítica chamada "Bin Method", que é um procedimento de cálculo feito em forma de tabela.

Kavanaugh (**KAV-92**; **KAV-92a** e **SOU-98b**) desenvolveu simulação para 3 estudos de caso comparativos (com equipamentos diferentes) em 3 regiões com climas diferentes nos EUA. Os valores são baseados em construções novas de acordo com as legislações de eficiência energética vigentes.

			Atlanta	(Georgia)	
		kWh	kWh	kWh	kWh
		Cooling	Heating	DHW	TOTAL
ASHP		3.409	7.396	4.120	14.925
ASHP VARIABE SPEED		2.499	5.540	4.120	12.159
GHP (std. eff.)		2.599	4.236	2.620	9.455
GHP (high. eff.)		2.079	3.510	2.509	8.098
			Spokane, WA		
		kWh	kWh	kWh	kWh
		Cooling	Heating	DHW	TOTAL
ASHP		773	11.475	4.120	16.458
ASHP VARIABE SPEED		435	9.295	4,12	13.850
GHP (std. eff.)		451	5.562	3.150	9.163
			Portland, OR		
		kWh	kWh	kWh	kWh
		Cooling	Heating	DHW	TOTAL
ASHP		513	6.666	4.120	11.299
ASHP VARIABE SPEED		285	4.706	3.150	9.111
GHP (std. eff.)		337	3.549	3.468	7.354
GHP (high. eff.)					

Tabela B.1 – Comparação entre diferentes sistemas em 3 localidades dos EUA (**SOU-98b**) onde: ASHP = Air Source Heat Pump; GHP = Ground Source Heat Pump

Os valores mostrados são de consumo em kWh por ano para cada um dos diferentes sistemas de acoplamento (com o ar e com o solo).

B.11) PROJETO E INSTALAÇÃO DE SISTEMAS

O arranjo e instalação das bombas de calor geotérmicas nos EUA estão se dando com o acompanhamento da **ASHRAE**, cuja finalidade é a normatização de equipamentos e processos envolvidos. Equipamentos e programas de computador que ajudam no dimensionamento destes sistemas podem ser obtidos através da – **IGSHPA**- **I**nternational **G**round **S**ource **H**eat **P**ump **A**ssociation (www.igshpa.okstate.edu) ou a **GHPC** - **G**eothermal **H**eat **P**ump **C**onsortium, Inc. (**GEO-98d**), mas a escolha de um determinado arranjo -vertical, horizontal, espiral, expansão direta, etc-, local de instalação do trocador com o solo -subsolo, lago, poço, etc.- devem ser baseadas no estudo do custo do ciclo de vida associadas às limitações práticas. Por exemplo, a instalação de sistemas verticais em geral é feita devido à limitação de terreno disponível -em contraste com o sistema horizontal, que é mais barato, mas requer grande área para colocação dos tubos de polietileno.

B.12) USO RESIDENCIAL, COMERCIAL (E OUTROS) DAS BOMBAS DE CALOR GEOTÉRMICAS Estudos de Caso

Os sistemas de GSHP têm uma área de aplicação bastante vasta, com aplicações nos USA que vão de residenciais, escolas, prédios de escritórios, quartéis militares, prisões, penitenciárias, indo até o setor rural. Os sistemas instalados começam em aproximadamente 1 tonelada de aquecimento/refrigeração (**GEO-98c**), como nas casas de famílias de militares, em Pensacola Naval Air Station, até sistemas de mais de 1600 tons de refrigeração. Vários estudos de caso estão disponíveis na literatura, especialmente na internet (**GEO-98d**), de onde provem a maioria dos casos relatados a seguir. Eles serão divididos,pela capacidade de deslocamento térmico, em: Residencial; Comercial, Escolas, Instalações Federais, Instituições Penais e um caso não usual de bomba de calor associada a um loop aberto de água em um navio de passageiros.

B.12.1) Instalações Residenciais

B.12.1.1) Geothermal Confort In Minnesota, Princenton, MN **(GEO-98e)**

Residência de aproximadamente 300 m^2 localizada no meio do estado do Minnesota, onde as temperaturas variam durante o ano de 32^0C (e 95% de umidade) a -28^0C no inverno. O sistema de troca térmica com o solo instalado consiste de cinco loops horizontais de polietileno (1000 metros de tubo) em uma área de 300m x 26m, a 2,5 metros de profundidade. A bomba de calor associada é uma ECONAR 5-ton GeoSource Heat Pump. Este sistema foi instalado logo após a construção da residência, por isto não há comparação de consumo e gasto em moeda corrente com sistema anterior. A conta média mensal de energia elétrica é de US$44.64, com uma demanda de 5.000^0C dia de aquecimento e 470^0C graus dia de refrigeração.

B.12.1.2) Energy Crafted Homes in Connecticut (**GEO-98f)**

A Empresa Northest de Hartford, Connecticut, promove um programa chamado "Energy Crafted Homes"(**ECH**) onde oferece assistência técnica e descontos em certos casos para que pessoas construam suas casas com equipamentos de alta eficiência. A avaliação do projeto é feita em conjunto proprietário/concessionária de eletricidade com a finalidade de se encontrar o sistema mais eficiente e vantajoso economicamente. Por isto, muitos construtores têm optado pela instalação de sistemas de GSHP.

Um destes é a residência dos Palmers em East Hampton, de 325 m^2 de área "condicionável", com demanda calculada de 49.614 Btu/h de aquecimento e 30.568 Btu/h de refrigeração. Foram instalados uma bomba de calor de 4.2 ton da empresa WaterFurnace e um sistema de troca com o solo composto por dois furos verticais de 83 metros de profundidade e 300 metros de tubo de polietileno. Os custo envolvidos na instalação foram: US$10.541 em equipamentos e dutos de GSHP, US$ 8.742 nas perfurações dos loops, perfazendo um total de US$19.541. Comparado com o orçamento recebido pelo proprietário do imóvel de US$16.200 para instalação de um sistema de ar condicionado central e caldeira a óleo, o investimento inicial em GSHP é US$3.341 maior. Entretanto, com o programa **ECH,** o proprietário recebeu descontos provenientes dos dispositivos estruturais instalados no imóvel (isolamento térmico das paredes, forro e piso, janelas de vidro duplo preenchidas com argônio e estanqueidade do ar interno) conferiram US$9 por metro quadrado de construção, ou US$2.987. Como o sistema de GSHP funciona com uma bomba de duas velocidades,

com eficiências diferentes, foi calculada uma eficiência média do sistema para calcular o desconto dado pelo programa por ton de GSHP: US$713/ton ou um total de US$2.971. Logo, o preço final do equipamento foi de US$13.325, ou US$2.875 menos que o sistema tradicional, que não recebe incentivo algum. Na tabela B.2 são mostrados os custos estimados de operação de vários sistemas.

				Water	Domestic	Total	Htg. Clg &	Total
		Heating	Cooling	Heating	Energy	Operating	DHW	Operating
HVAC								
System								
Geoexchange		US$978	$189,00	$243,00	$537,00	$1.947,00	$118,00	$162,00
System dual								
Fuel Back-up								
Oil-								
Furnace		$1.162,00	$236,00	$207,00	$572,00	$2.142,00	$131,00	$179,00
Elec AC								
Gas-								
Furnace		$1.025,00	$247,00	$169,00	$572,00	$2.013,00	$120,00	$168,00
Elec AC								
Eletric		$2.983,00	$230,00	$626,00	$537,00	$4.376,00	$320,00	$365,00
Resistance								

Tabela B.2 Estimativa de custos de operação do sistema GSHP na residência dos Palmers

B.12.1.3) Scenic St. George, Utah **(GEO98g)**

A construtora MBM, de Utah, USA, adotou o sistema GSHP como forma de aumentar a eficiência energética de suas construções. Para convencer os clientes não familiarizados com o sistema, esta empresa paga o primeiro ano de contas de energia elétrica para aquecimento e refrigeração de suas residências. Um dos casos relatados é o de uma construção de 340 m^2, isolamento térmico R-21, janelas de vidro duplo e várias outros dispositivos de conservação térmica que resultaram em uma demanda de bomba de calor de 2 ½ ton conectada a um sistema vertical de troca de calor com o solo (que nesta região de St. George é da ordem de 70m de furo vertical por ton de refrigeração. O sistema tem um **COP** de 3,5 e uma razão de eficiência energética (Energy Efficiency Ratio – EER) de 13,5. No caso de aquecimento, este sistema é de 80% a 100% mais eficiente que o sistema de troca com o ar e em modo refrigeração, de 30% a 40% mais eficiente.

Outros estudos de caso de aplicação de GSHP em residências disponíveis na literatura são:

"Esperanza Del Sol" **(GEO-98h)**

“Garden East Apartments, South Australia” **(GEO-98I)**

“Hillside Oaks,East Dallas, Texas” **(GEO-98j)**

“Millenium House 1995” **(GEO-98k)**

B.12.2) – Setor Comercial

B.12.2.1) Braun’s Bicycle Store, Kitchener, Ontário (**GEO-98l**)

Na reforma da loja de bicicletas da família Braun, foi instalado em seus quase 800 metros quadrados de área um sistema vertical de GSHP para condicionamento de ambiente. O sistema consta de cinco furos com 45 metros de profundidade e capacidade de refrigeração de 5 tons, divididos em duas unidades. O condicionamento da parte principal do prédio é feito pelo GSHP, enquanto que o aquecimento complementar da área de trabalho é feito por resistências elétricas. Após a instalação do sistema, a conta de energia para aquecimento caiu de US$85/dia no inverno de 1985 para US$10/dia no inverno seguinte. A economia anual está na casa dos US$7.900,00; o que significa que o sistema se paga em menos de 3 anos. São relatados também outros benefícios que foram obtidos com o “retrofit”: melhoria do controle de distribuição do ar e da umidade, diminuição de risco de incêndio e aumento da área útil, devido à eliminação da fornalha e do reservatório de óleo. É mostrado na tabela B.3 os resultados obtidos e a comparação com o sistema convencional.

Comparative Economics		
Costs	**Conventional System**	**GHP System**
Capital Cost	$19,750	$40,810
Heat pumps & equipment, collectors & installation, with ducting improvements	N/A	$35,650
Resistance heating for basement	N/A	$5,160
Combustion furnace with installation and electric air conditioning	$19,750	
Annual Energy Cost	**$10,950**	**$2,989**

Tabela B.3 Estudo comparativo entre o sistema tradicional de condicionamento de ambiente e após o retrofit com o GSHP.

B.12.2.2) Corps of Engineers Headquarters, Walla Walla, Washington (**GEO-98m)**

O sistema consiste de 129 bombas de calor ar-água -com equipamentos que vão de 0,5 tons até 10 tons; capacidade total de 286 tons de refrigeração e 1,8 10^6 BTU/h de aquecimento-. São conectados a um sistema de fechado de água de 40 l/s com o sistema de distribuição de água da cidade através de trocadores de calor, que mantém o isolamento entre a água que circula no prédio e a água de distribuição municipal. O prédio tem 10.000 m^2 de área construída, estrutura com eficiência energética convencional -obedecendo aos padrões do governo americano, que é de 40.000 Btu/pé quadrado/ano-. Os principais consumidores de energia são uma central de impressão (o maior consumidor), computadores pessoais para os ocupantes do prédio e o sistema de condicionamento de ambiente.

Devido às cargas térmicas existentes dentro do prédio, o sistema é utilizado praticamente só para refrigeração. Desta forma, a água devolvida ao sistema de distribuição da cidade tem temperatura mais alta do que a que não passou pelo sistema de troca térmica. No projeto está previsto um máximo de elevação desta água devolvida ao sistema de abastecimento da ordem de $5,5^0$C. O estudo do LCC foi feito com o programa E20-II, da Carrier Corporations e o projeto arquitetônico/mecânico com o programa BLAST, do "Corps of Engineers". O custo total do sistema foi de US$1.087.000,00 sendo US$215.000,00 só para as bombas térmicas (custo unitário médio de US$1.671,00). O sistema implantado foi comparado com duas outras alternativas: "Variable Air Volume – VAV" e "Multizone –MZ". Os custos envolvidos são mostrados na tabela B.4

Comparison of HVAC System 25 Year Life Cycle					
	Initial Investment Cost ($)	Energy Costs ($)	Recurring M&R Costs ($)	Repair & Replacement	Total LCC (NetPW) ($)
Geothermal Heat Pump	387,555	270,963	46,51	19,114	724,143
Variable air Volume/ Reheat	525,768	250,496	7,652	0	783,916
Multizone	124,56	122,011	7,652	0	2,428,436

Tabela B.4. Comparação de custos entre o sistema GSHP instalado e duas outras alternativas

B.12.2.3) Phillips 66 Service Station **(GEO-98a7)**

A empresa americana Phillips Petroleum Co. adotou o sistema GSP em um de seus postos de gasolina, em Prarie Village, Kansas, para fornecer energia térmica para descongelamento dos acessos ao posto (no inverno), produção de água quente e irradiação de calor para as baias de lavagem de automóveis. O sistema adotado consiste de 10 furos verticais, 100 metros de profundidade, uma bomba de calor (COP 3-3,5 e EER 11.6-13.5) de 5 tons. Apesar do custo de US$25.000,00 a US$35.000,00 acima dos sistemas tradicionais, a empresa conta com retorno do investimento já no final do segundo ano de instalação, com a expectativa de redução dos custos de eletricidade nos 20 anos de vida do equipamento se situarem na casa dos US$250.000,00.

Vários outros estudos de caso no setor comercial estão disponíveis na literatura, como:
Du Pont Medical Center, Fort Wayne, Indiana **(GEO-98n)**
Holiday In Express, Albany, New York **(GEO-98o)**
North Boneville City Hall, North Boneville, Washington **(GEO-98p)**

B.12.3) Instituições Federais (USA)

B.12.3.1) Geothermal Heat Pumps at Fort Polk Base Housing, Louisiana (**GEO-98q; GEO-98r e HUG-96)**

O Oak Ridge National Laboratory, com apoio do U.S.Department of Defense (**DoD**), do U.S. Department of Energy (**DOE**) e a participação da Louisiana State University, U.S.Army Corps of Engineers Cold Regions, U.S.Army Engineering and Support Center em Huntsville e a Co-Energy Group realizaram o maior projeto de instalação de GSHP relatado até o momento, em Fort Polk, uma unidade militar no centro-oeste de Louisiana, USA, com aproximadamente 1000 km^2 de escritórios militares, centros de treinamentos, armazéns, paióis e um hospital, além de uma área residencial onde moram 23.000 pessoas, entre militares e familiares com 4003 unidades distribuídas em 1296 prédios. O **GSHP** foi implantado na área residencial, cujas condições iniciais eram:
- Aproximadamente 80% das residências tinham bombas de calor ar-ar e aquecedores de água elétricos;

-20% das residências com ar condicionado central. Aquecimento de ambiente e água fornecidos por aquecedor a gás natural.

Em 1994, o U.S.Army fechou contrato com a Co-Energy Group para a substituição de todos os equipamentos de condicionamento de ambiente destas residências em Fort Polk.

Descrição do Projeto:

As unidades de GSHP substituíram 3.243 bombas de calor ar-ar e 760 sistemas de ar condicionado central e aquecedores de gás natural. Cada residência conta agora com unidades de bomba de calor de 1 ½ a 2 ton de refrigeração, num total de 6.593 tons e uma média 1,65 tons por residência. Cada unidade de bomba de calor tem seu próprio trocador de energia com a terra, consistindo de 2 furos de 4 polegadas (10 cm) entre 40 e 150 metros de profundidade no solo. Foram feitos um total de quase 600 km de furos verticais e 1200 km de tubos de polietileno de alta densidade (SDR-11). A empresa Co-Energy Group, que normalmente tem 12 funcionários, teve que contratar mais 150 empregados temporários para gerenciar as nove empresas contratadas para efetuar os furos, com até 27 equipamentos fazendo furos simultaneamente, perfurando de 75 a 80 furos e instalando até 20 bombas de calor por dia. Uma das linhas de produção da fábrica de tubos de polietileno ficou ocupada por um ano inteiro somente para atender este pedido. A razão de eficiência energética sazonal (SEER) que era de 7 a 8, passou, após o retrofit, para algo em torno de 15,5.
O contrato de implantação do sistema foi orçado em US$18.000.000,00. A Companhia de Eletricidade local financiou o projeto, com custo virtualmente zero para o Fort Polk. O Departamento de Defesa (DoD) por sua vez, devolve 77,5% da economia de energia à Cia de Eletricidade. Como a propriedade e manutenção do equipamento serão de responsabilidade da Cia de Energia durante o tempo do contrato (20 anos), os US$1,3 milhões estimados de manutenção durante este período também serão economizados pelo DoD. Ao Fort Polk caberá os 22,5% restantes, ou US$744.800,00 esperados de economia de energia e manutenção anualmente, durante os 20 anos. Vencido o prazo do contrato, Fort Polk será proprietário do equipamento.

Economia de Energia

Os dados foram coletados em três níveis, desde os dados globais de demanda e consumo de energia de todo o sistema, até os mais detalhados, em que se fez coleta, por amostragem, do consumo de energia por GSHP e por tipo de construção (dados

coletados a cada 15 minutos). Resultados apresentados em janeiro de 1997 indicaram uma economia de 25.600.000 kWh em consumo de eletricidade, ou 32%, em um ano meteorológico típico. A economia de gás natural foi estimada em 260.000 therms/ano. Tomados individualmente, a redução de consumo de energia de cada planta de GSHP depende de vários fatores, inclusive o equipamento prévio existente nas residências. Onde era utilizado gás natural para aquecimento de ambiente e de água, a redução do consumo de eletricidade foi menor que nas residências providas de ar condicionado; como era de se esperar. A tabela B.5 mostra a variação do consumo de energia pré e pós "retrofit" de algumas residências:

-- Energy Savings by Feeder forTypical Meteorological Year			
Feeder	Pre-Retrofit Annual kWh	Post-Retrofit Annual kWh	Total Savings	Percent Savings
1	2,873,818	2,008,532	865,286	30.1%
2	27,722,779	19,047,205	8,675,575	31.3%
3	1,273,006	971,875	301,131	23.7%
4	170,119	176,779	-6,66	-3.9%
5	2,134,857	2,125,661	9,196	0.4%
6	1,551,444	999,222	552,221	35.6%
7	13,921,102	6,169,796	7,751,306	55.7%
11	2,284,612	1,910,931	373,681	16.4%
12	2,008,792	1,670,374	338,418	16.8%
13	2,214,590	1,848,926	365,664	16.5%
14	2,530,362	2,085,527	444,835	17.6%
15	4,132,427	2,669,872	1,462,555	35.4%
16	6,111,433	4,755,023	1,356,410	22.2%
17	4,015,635	3,032,894	982,741	24.5%
18	3,393,136	2,354,659	1,038,477	30.6%
19	3,693,865	2,570,669	1,123,197	30.4%
Total	80,031,977	54,397,946	25,634,031	32.0%

Tabela B.5 **(GEO-98q)** Economia de energia em vários casos de Fort Polk, para um ano meteorológico típico, elaborado pelo Oak Ridge National Laboratory.

A figura B.31 e tabela B.6 **(HUG-96**) dão resultados obtidos em consumo de energia pré e pós retrofit, em função da temperatura média diária; comparação entre diversos sítios e suas respectivas economias e acompanhamento do deslocamento dos picos de consumo em aquecimento e refrigeração.

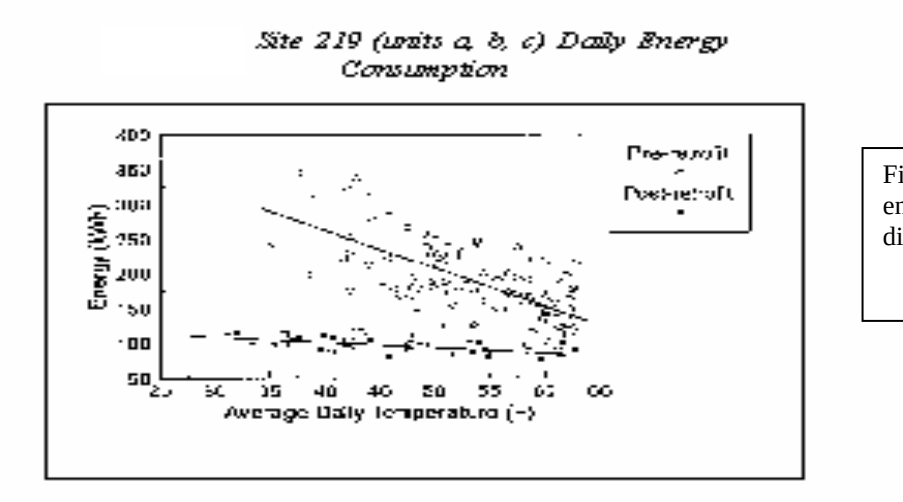


Figura B.31 Consumo diário de energia vs. temperatura média diária para o sítio 219

Comparison of Post-Retrofit Energy Consumption and Calculated Pre-Retrofit Consumption

Site	Pre-Retrofit Energy Consumption (kWh)	Post-Retrofit Energy Consumption (kWh)	Savings, kWh (%)
210	18130	12040	6089 (34%)
213	24271	14988	9283 (38%)
218	9746	9746	4176 (57%)
219	11809	5203	6606 (56%)

Tabela B.6 Comparação de consumo de energia pré e pós retrofit

Mais casos de instalação de GSHP em bases militares nos EUA podem ser vistos em: **GEO-98s**; **GEO-98t** e **GEO-98u**. Aplicações em presídios podem ser consultados em **GEO-98v**; **GEO-98w** e **GEO-98x.**

B.12.4) A Associação Cristã de Moços (**YMCA**) em Bixby, Oklahoma instalou, com a cooperação da comunidade local, um sistema GSHP de 92 tons de refrigeração e 10.600 metros de tubo de polietileno, disposto horizontalmente sob a área de estacionamento, em seu prédio de aproximadamente 3.700 m^2 (com piscina, sala de aeróbica, pista de corrida, ginásio e escritório). O custo total foi de US$ 2.326,00 por ton **(GEO-98y)**. A conta de energia elétrica em um prédio de características

semelhantes é da ordem de US$5.000,00 por mês, enquanto que neste não é mais de US$2.700,00/mês, com uma previsão de economia de energia em dez anos de aproximadamente US$100.000,00.

B.12.5) ESCOLAS

B.12.5.1) Daniel Boone High School, Washington County, Tennessee **(GEO-98z)**

Após avaliação de várias alternativas para a substituição do sistema de condicionamento ambiental pré-existente, a direção da Daniel Boone High School optou pela implantação de um sistema GSHP modular e fluxo de bombeamento variável que permite, além da escolha de que áreas serão condicionadas, a entrada/saída gradativa de cada um dos dois pares de bombas de circulação de fluido de duas velocidades. Um sistema microprocessado controla as bombas e válvulas instaladas no sistema, permitindo a obtenção de performance otimizada, sem necessidade de utilização de caros e complexos variadores de velocidade. Alem disto, o projeto é um sistema aberto, no sentido que permite redimensionamento, no caso de expansão física e/ou de alunos (atualmente 1.100), com a simples adição de mais módulos no sistema, conectando-o ao sistema através de válvulas previamente instaladas. As figuras B.32, B.33 e B.34 mostram o layout do sistema de troca térmica com o solo e as avaliações de economia de energia observadas.

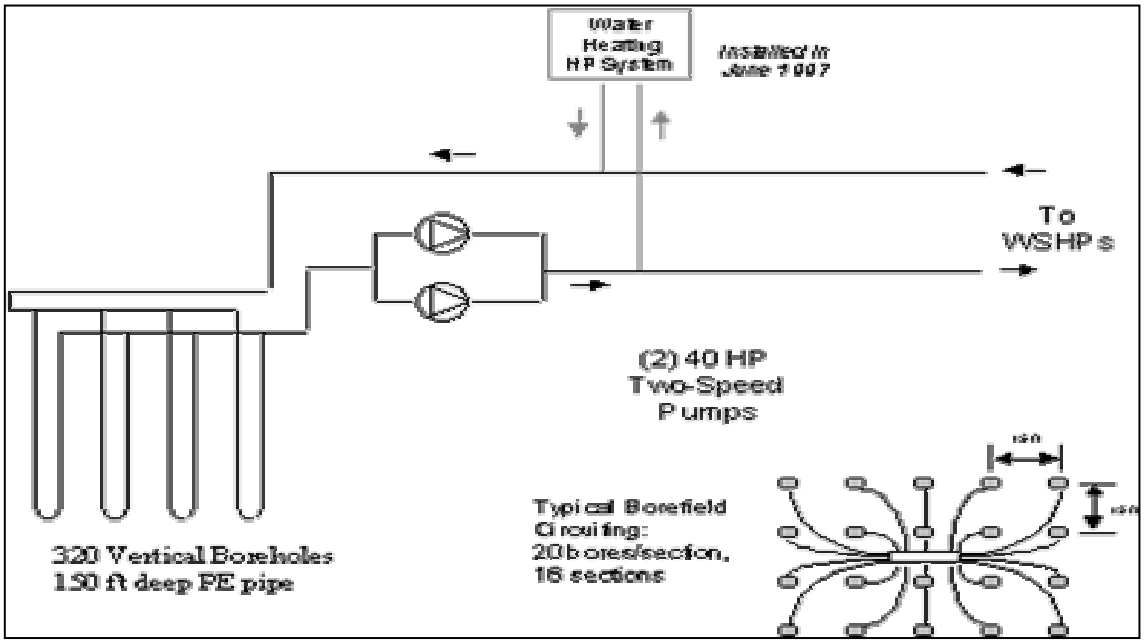


Fig. B.32 Esquema básico do sistema de troca térmica do GSHP instalado no Daniel Boone High School, Tennessee

Descrição: área da escola:53.000 m^2

bomba de calor: 300 ton sistema: GSHP

trocadores com o solo: 320 furos, cada um com 50m de profundidade

cada furo com 100 m de tubo de polietileno de 3/4”

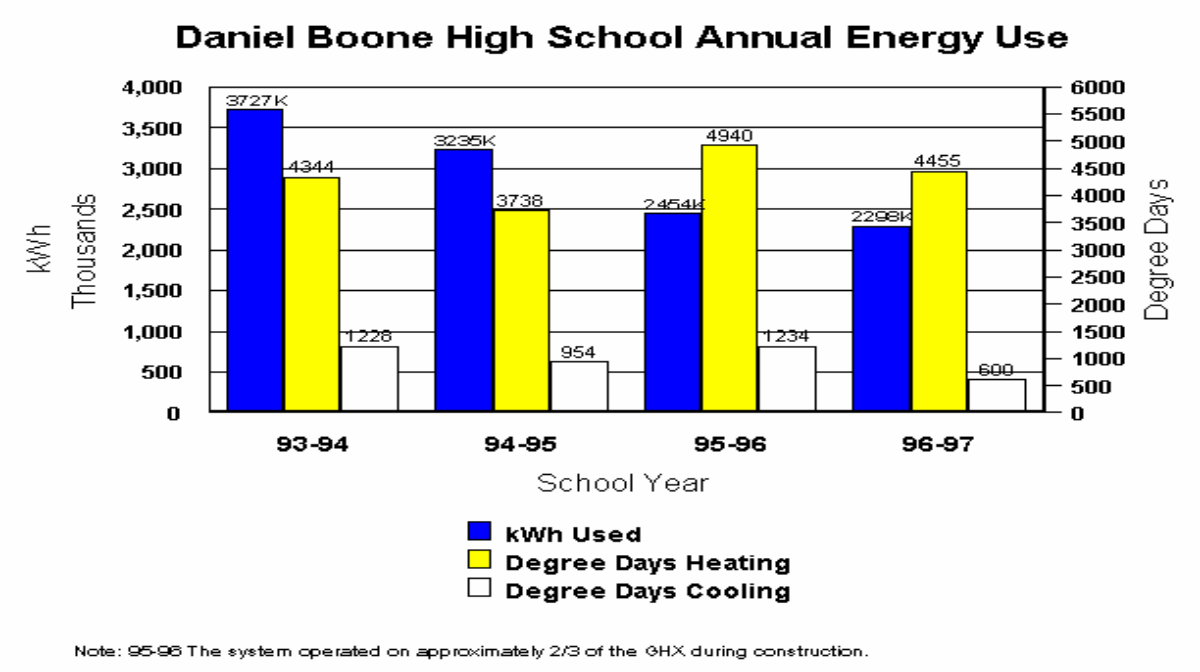


Figura B.33 Relação entre uso de energia – graus dia- durante dois anos antes do retrofit e dois anos após o retrofit -incluindo 1 ano em que o sistema funcionou somente com parte do equipamento de troca de calor, devido a atrasos no cronograma de instalação dos mesmos-.

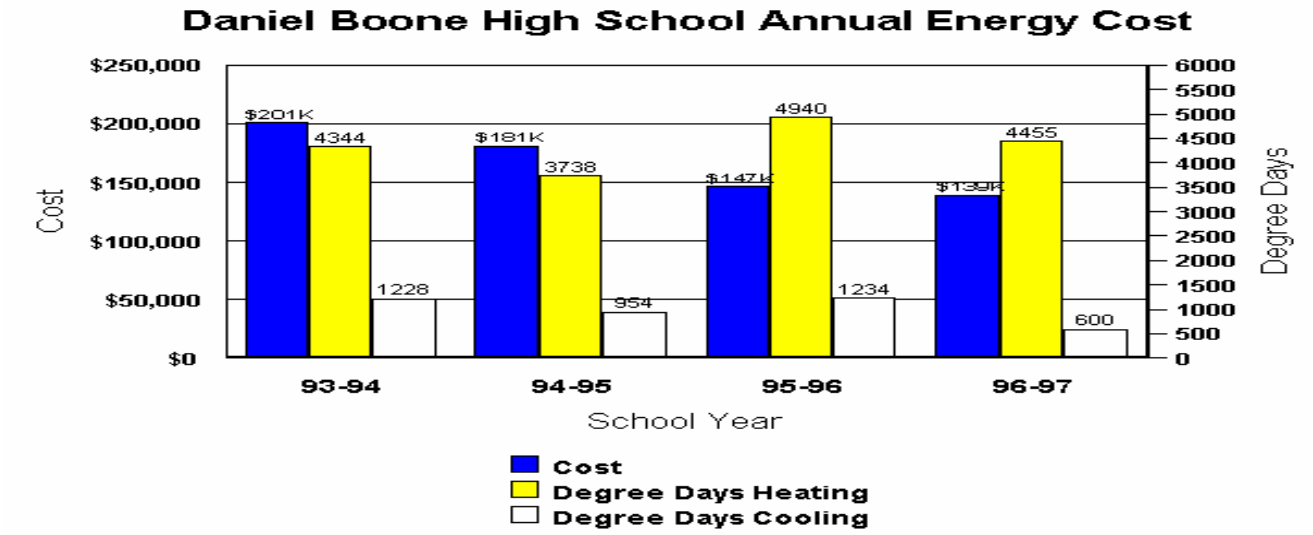


Figura B.34 Relação entre custo de energia – graus dia- durante dois anos antes do retrofit e dois anos após o retrofit -incluindo 1 ano em que o sistema funcionou somente com parte do equipamento de troca de calor-.

Custos

O custo total da substituição foi orçado em US$451.000,00. Levando-se em conta a economia de energia e manutenção do novo sistema e mais inversões feitas pela Cia. Elétrica, a direção da escola calcula que o investimento será pago entre 5.3 anos e 6 anos.

B.12.5.2) Richard Stockton College of New Jersey **(GEO-00)**

Caso extensivamente estudado, o GSHP instalado no R.S. College consiste de 400 furos de 142 metros de profundidade e 1660 tons de refrigeração, passando por três aquíferos diferentes: Upper Cohansey; Lower Cohansey e Rio Grande (desenho esquemático na figura B.35)

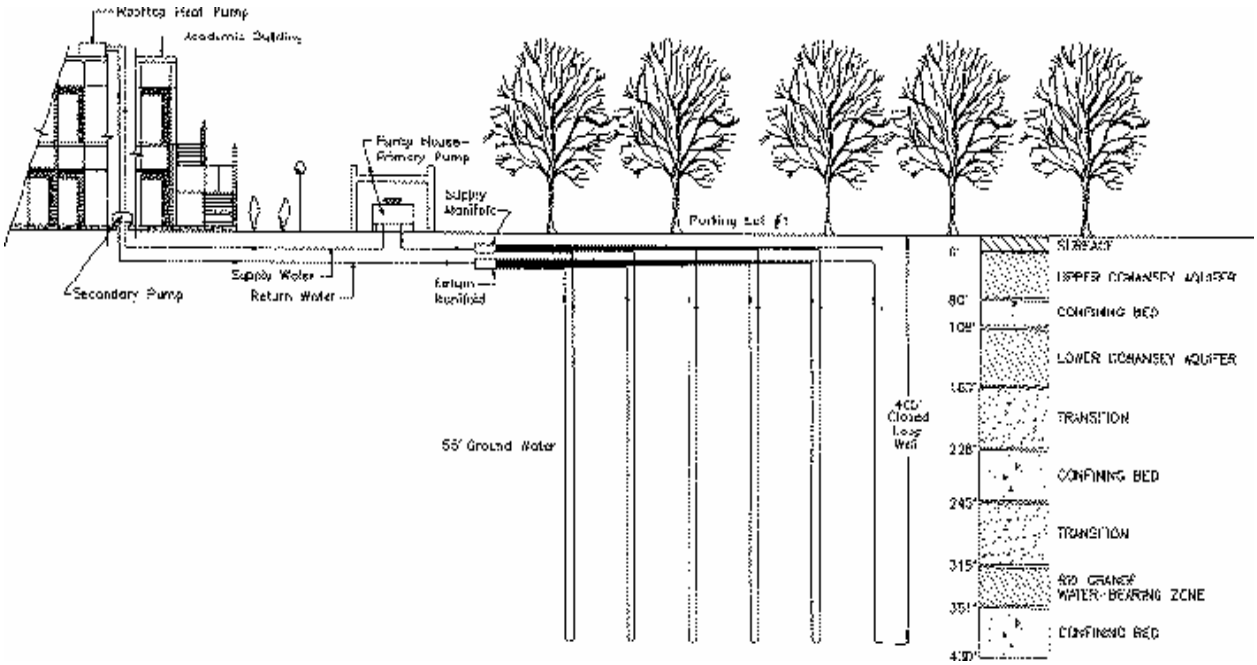


Fig. B.35 – Desenho esquemático do sistema GHP instalado no Richard Stockton College, NJ

A fig. B.36 e B.37 mostram o sistema de tubos de polietileno sendo montados

Figura B.36 vista dos tubos laterais **GEO-00**

Fig. B.37 tubo sendo descido ao poço **GEO-00**

O monitoramento das condições climáticas, temperaturas interna e externa, temperatura de bulbo úmido, insolação, velocidade e direção de vento, temperaturas de entrada e saída da água no GSHP, fluxo, energia elétrica consumida pelas bombas de calor e pelo prédio tem sido feito desde sua instalação. No ano de 1995, ainda com a instalação incompleta, já é reportada uma economia de 1.25 milhões de kWh e redução de 725 kW de pico na estação de refrigeração (verão) de abril de 1994 a setembro de 1994. Espectros típicos de temperatura ambiente; temperatura de entrada e saída de água dos tubos, fluxo; potência retirada e depositada no solo e insolação coletados no R.S. College são mostrados a seguir:

Figura B.38 Acompanhamento da temperatura ambiente ao longo do dia (15/15 min) **GEO-00**

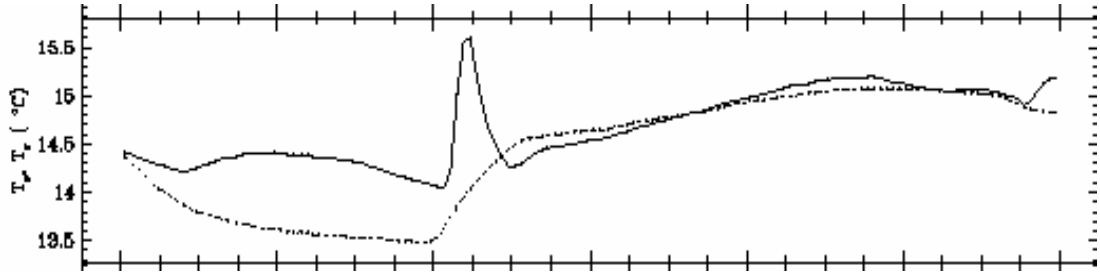


Figura B.39 Acompanhamento da temperatura dos tubos de entrada e saída ao longo do dia (15/15 min) ^{0}C **GEO-00**

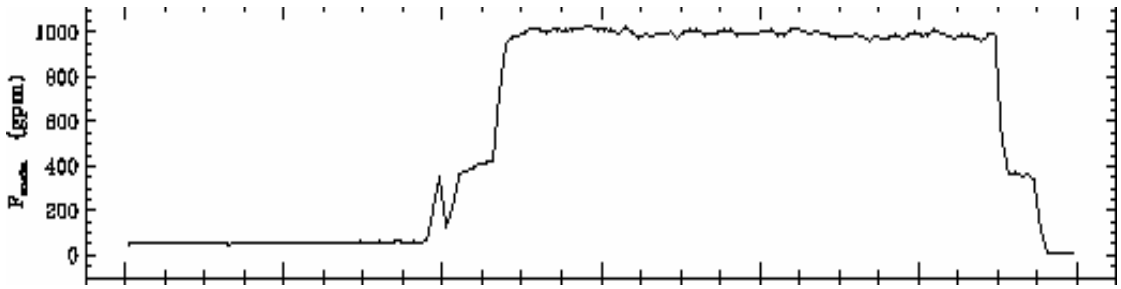


Fig. B.40 Acompanhamento do fluxo no tubo principal em galões por minuto (15/15 min) **GEO-00**

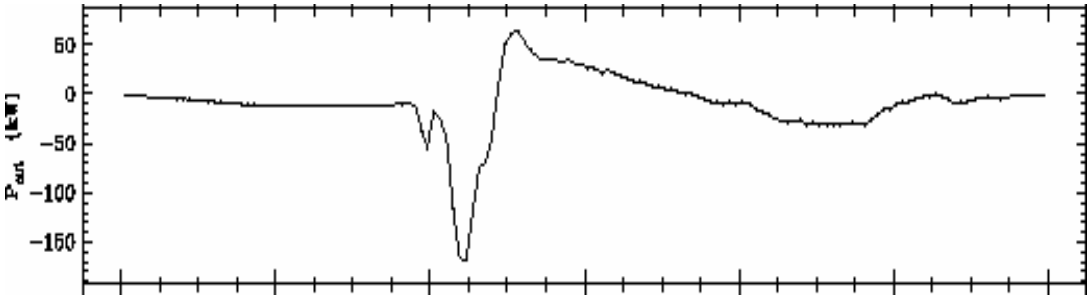


Fig. B.41 Acompanhamento da potência depositada ou retirada do solo em kilowats **GEO-00**

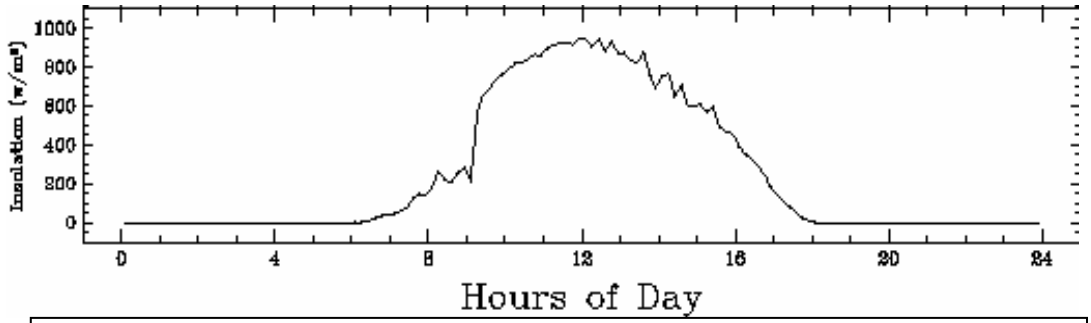


Fig. B.42 Acompanhamento da insolação no solo em watt/m^2 **GEO-00**

Mais estudos de caso acerca de GSHP em escolas podem ser encontrados em, por exemplo: **GEO-98a1; GEO-98a2; GEO-98a3**

B.12.6) APLICAÇÕES DE GSHP NA AGRICULTURA

Embora o GSHP seja muito pesquisado para condicionamento de espaços construídos, vários outros setores da sociedade podem se beneficiar desta tecnologia. No setor agrícola, vários sistemas já se encontram em uso, como em **GEO-98a4,** onde foi instalado em Ontário, Canadá um GSHP em estufas de sementes que fornece 36 tons de aquecimento para uma área de 750 m^2 , economizando de 30 a 50% de energia,

quando comparada a uma mesma estufa aquecida com gás natural. Também em Ontário, existe um sistema de condicionamento por GSHP aplicado à cultura de cogumelos, onde o calor é proveniente da decomposição de produtos orgânicos utilizados para produção dos cogumelos. Em Hammonton, Nova Jersey, USA, a Fazenda Buffalo instalou em 1993 um sistema de refrigeração para seus 900.000 quilos de plantas (blueberries) a aproximadamente -2^0C, cortando 35% dos custos com refrigeração. Na fazenda "Fred bass" em Franklinton, Lousiana, um sistema **GSHP** instalado desde 1990 tem mantido a temperatura do criadouro de pintinhos, diminuindo as mortes prematuras (principalmente por frio) e, desta forma, aumentando a produção e rentabilidade da fazenda. Outras iniciativas bem sucedidas podem ser observadas em **GEO-98a5.**

B.12.7) UTILIZAÇÃO NÃO USUAL DE GSHP

Navio de passageiro **(GEO-98a6)**

Um sistema aberto -com água do mar-, composto de 5 bombas de calor, perfazendo um total de 23 tons de refrigeração está instalado no navio de cruzeiro de 65 metros de comprimento, o "Spirit of Columbia", da empresa Seattle's Pacific Fisherman Shipyard. Segundo a empresa, o sistema foi tão satisfatório que pretendem equipar outros navios com este recurso.

Apêndice C

Dimensionamento de sistemas GSHP

Fluxo de Calor

1 dimensão

Em uma dimensão, a equação de condução de calor de Fourier é dada por:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \qquad \text{(C.1)}$$

No caso de um sólido infinito em que o fluxo se dá apenas na direção *x* e todos os planos paralelos ao plano *yz* são superfícies isotermas -a temperatura inicial é dada como função da coordenada *x*-, a solução da equação (C.1) deve satisfazer:

$T = f(x)$ quando t=0 (C.2)

Fazendo $T = e^{bt + cx}$ (C.3)

Temos $b = \alpha c^2$

$c = \pm i\gamma$ (C.4)

obtemos então:

$$T = Le^{-\alpha\gamma^2 t} e^{i\gamma x} \qquad \text{(C.5)}$$

e

$$T = Me^{-\alpha\gamma^2 t} e^{-i\gamma x} \qquad \text{(C.6)}$$

mas como:

$$e^{\pm i\gamma x} = \cos\gamma x \pm i\,\mathrm{sen}\,\gamma x \qquad \text{(C.7)}$$

combinando (C.5) e (C.6) por adição e subtração e escolhendo valores convenientes de L e M, as soluções particulares:

$$T = e^{-\alpha\gamma^2 t}\cos\gamma t \qquad \text{(C.8)}$$

e

$$T = e^{-\alpha\gamma^2 t}\,\mathrm{sen}\,\gamma t \qquad \text{(C.9)}$$

(C.8) e (C.9) são soluções particulares de (C.1), para qualquer valor de γ -que não é função nem de *x* nem de *t*-. Multiplicando (C.8) e (C.9) por B e C (funções quaisquer de γ), obtemos uma soma de séries infinitas do tipo:

$$\mathrm{T} = \int_0^\infty \left(B\cos\gamma x + C\mathrm{sin}\gamma x\right).e^{-\alpha\gamma^2 t}d\gamma \qquad \text{(C.10)}$$

Que também é uma solução da equação diferencial, já que ela é linear e homogênea.
Fazendo $t = 0$, a equação (C.10) fica uma f(x).

Como o estudo dos problemas de condução de calor nos obriga a lançar mão das funções trigonométricas como forma de reproduzir as equações de condução de calor e ao mesmo tempo atender as condições de contorno, Fourier desenvolveu um conjunto de equações em séries de senos e cosenos, conhecidas como **séries de Fourier.** Estas séries podem ser expressas em forma de integrais de séries de cosenos, representando a função $f(x)$ na forma:

$$f(x) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} f(\lambda)d\lambda \int_{-\infty}^{\infty}\cos\gamma(\lambda - x)d\gamma \qquad \text{(C.11)}$$

ou, como cos é função par:

$$f(x) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(\lambda) d\lambda \int_{0}^{\infty} \cos\gamma(\lambda - x) d\gamma \qquad \text{(C.12)}$$

que deve ser igual a (C.10), o que implica que:

$$B = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(\lambda) \cos\gamma\lambda d\lambda \qquad \text{(C.13)}$$

e

$$C = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(\lambda) sin\gamma\lambda d\lambda \qquad \text{(C.14)}$$

substituindo (C.13) e (C.14) em (C.10):

$$\text{T} = \frac{1}{\pi} \int_{0}^{\infty} .e^{-\alpha\gamma^2 t} d\gamma \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \cos\gamma(\lambda - x) d\lambda \qquad \text{(C.15)}$$

que é a solução procurada, pois satisfaz (C.1) e reduz-se a *f(x)* quando *t* = 0

Esta solução pode ser simplificada e colocada em modo mais conveniente (ING-54):

$$\text{T} = \frac{T_0}{\sqrt{\pi}} \int_{(l-x)\eta}^{(m-x)\eta} e^{-\beta^2} d\beta \qquad \text{(C.16)}$$

Esta integral é chamada de **Integral de Probabilidade ou Função Erro**, quando seus limites são de $-x$ a x.

l e m valores particulares de λ.

e onde fizemos:

$$\eta = \frac{1}{2\sqrt{\alpha t}} \qquad \text{(C.17)}$$

α é chamado de *coeficiente de difusividade,* que é a razão da condutividade *k* dividido pelo produto do calor específico *c* com a densidade ρ ($\alpha = \frac{\kappa}{c\rho}$)

$$\beta = (\lambda - x)\eta \qquad \text{(C.18)}$$

Esta solução pode ser aplicada nos casos em que *f(x)* = T_0 para x>0 e *f(x) = 0* para x<0. Neste caso os limites serão: $-x\eta$ e ∞ .

FONTES DE CALOR

Este conceito foi inicialmente desenvolvido por Lord Kelvin para considerar fontes (ou sumidouros) de calor em uma, duas ou três dimensões.

Se uma quantidade de energia térmica é subitamente depositada em um ponto (ou área ou volume), este ponto (ou área ou volume) torna-se uma fonte instantânea de energia. Se por outro lado, esta energia é depositada continuamente, temos uma fonte contínua ou permanente de energia térmica.

Seja , por exemplo, *Q* unidades de energia térmica gerada instantaneamente por unidade de área de um plano em um corpo infinito -ou mesmo uma área de secção transversal de uma haste longa-. Se o material tem um calor específico "*c*" e densidade "ρ", uma unidade de energia térmica aumentará a temperatura de uma unidade de volume de $1/c\rho$ graus.

A quantidade $S = \frac{Q}{c\rho}$ (C.19)

é chamada de "força" da fonte instantânea

Se *Q*' unidades são produzidas em cada unidade de tempo, então:

$$S' = \frac{Q'}{c\rho} \qquad \text{(C.20)}$$

é a "força" da fonte permanente.

FONTE PLANA DE CALOR:

Seja um plano x = λ, sobre o qual uma fonte instantânea de energia térmica é gerada (os planos paralelos a λ são isotermas) e se espalha na espessura Δλ. Então sua temperatura será:

$$\frac{Q}{c\rho\Delta\lambda} = \frac{S}{\Delta\lambda}\, graus \qquad \text{(C.21)}$$

Tomando-se a equação (C.15), modificando a ordem de integração e calculando-se uma de suas integrais, temos:

$$T = \frac{\eta}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(\lambda) e^{-(\lambda - x)^2 \eta^2} d\lambda \text{ .....(C.22)}$$

em que a $f(\lambda)$ é substituída por $\frac{Q}{c\rho\Delta\lambda}$ e os limites da integral reduzidos a λ e λ+Δλ:

(uma vez que $f(\lambda)$ é zero fora destes limites) o que dá:

$$T = \frac{S\eta}{\Delta\lambda\sqrt{\pi}} \int_{\lambda}^{\lambda+\Delta\lambda} e^{-(\lambda - x)^2 \eta^2} d\lambda \qquad \text{(C.23)}$$

Fazendo o valor médio da integral em $e^{-(\lambda - x)^2 \eta^2}$ entre os limite acima ser $e^{-(\lambda' - x)^2 \eta^2}$, onde $\lambda < \lambda' < (\lambda + \Delta\lambda)$, temos:

$$T = \frac{S\eta}{\sqrt{\pi}} e^{-(\lambda' - x)^2 \eta^2} \qquad \text{(C.24)}$$

quando $\Delta\lambda \rightarrow 0$, temos, no limite:

$$T = \frac{S\eta}{\sqrt{\pi}} e^{-(\lambda - x)^2 \eta^2} \qquad \text{(C.25)}$$

onde a fonte de calor está num plano λ distante da origem. Se deslocarmos este plano para a origem, (C.25) torna-se:

$$T = \frac{S\eta}{\sqrt{\pi}} e^{-x^2 \eta^2} \qquad \text{(C.26)}$$

Que é a temperatura de qualquer ponto em qualquer tempo, se tivermos um fluxo linear de energia da fonte instantânea de força *S* na origem e temperatura de todo o resto igual a zero no tempo zero.

Se temos uma fonte permanente de calor de "força" constante *S'* localizada em um plano distante λ da origem que começa a liberar energia térmica em um corpo inicialmente a zero graus no tempo $t = 0$, temos então em qualquer tempo posterior *t* a soma de cada efeito $S = S'd\tau$ que agiu previamente no tempo $t\text{-}\tau$ (onde τ é a variável de tempo, com limites 0 e *t*). De (C.25), temos então, com o uso de (C.17):

$$T = \frac{S'}{2\sqrt{\pi\alpha}} \int_0^t e^{\frac{-(\lambda - x)^2}{4\alpha(t-\tau)}} (t - \tau)^{-1/2} d\tau \qquad \text{(C.27)}$$

onde α é a difusividade térmica do meio.
Se a fonte permanente está na origem, a expressão (C.27) fica:

$$T = \frac{S'}{2\sqrt{\pi}\alpha}\int_0^t e^{\frac{-x^2}{4\alpha(t-\tau)}}(t-\tau)^{-1/2}\,d\tau \qquad \text{(C.28)}$$

com a transformação: $\beta = \frac{x}{2\sqrt{\alpha(t-\tau)}}$ (C.29)

temos, para valores positivos de x*:*

$$T = \frac{S'x}{2\alpha\sqrt{\pi}}\int_{\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}}^{\infty}\frac{e^{-\beta^2}}{\beta^2}d\beta \;\; = T = \frac{Q'x}{2k\sqrt{\pi}}\int_{x\eta}^{\infty}\frac{e^{-\beta^2}}{\beta^2}d\beta \qquad \text{(C.30)}$$

onde $\int_{x\eta}^{\infty}\frac{e^{-\beta^2}}{\beta^2}$ pode ser substituído por $-\frac{e^{-\beta^2}}{\beta} - \int_{x\eta}^{\infty}e^{-\beta^2}$ e cujos valores podem ser avaliados através de tabelas de integrais. Para valores negativos de *x* o limite superior é -∞, dando os mesmos valores de *T* quando *x* é positivo.

De (C.26) podemos concluir que a quantidade total de energia térmica em qualquer tempo é exatamente igual à quantidade original *Q* (por unidade de área da secção): de (C.19) e (C.26), a quantidade de energia térmica em um elemento *dx* será:

$$Tc\rho dx = \frac{Q\eta}{\sqrt{\pi}}e^{-x^2\eta^2}dx \qquad \text{(C.31)}$$

e a quantidade total de energia no corpo pode ser obtida por:

$$\int_{-\infty}^{+\infty}Tc\rho dx = \frac{Q\eta}{\sqrt{\pi}}\int_{-\infty}^{+\infty}e^{-x^2\eta^2}dx \qquad \text{(C.32)}$$

que, com a substituição: $x\eta = \zeta$ (C.33)

obtemos:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} Tc\rho dx = \frac{Q\eta}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{-\zeta^2}}{\eta} d\zeta = Q \qquad \text{(C.34)}$$

O que confirma a afirmativa acima.

Para se obter o instante t_1 em que se tem o máximo de temperatura basta derivar *T* em relação a *t* na equação (C.26) e igualar a zero:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{S\eta}{\sqrt{\pi}} e^{-x^2\eta^2} \left(\frac{x^2}{4\alpha t^2} - \frac{1}{2t}\right) \qquad \text{(C.35)}$$

dando:

$$t_1 = \frac{x^2}{2\alpha} \qquad \text{(C.36)}$$

e colocando (C.36) em (C.26), temos finalmente:

$$T_1 = \frac{S}{x\sqrt{2\pi e}} \qquad \text{(C.37)}$$

Em corpos semi-infinitos com temperatura inicialmente igual a zero, em que sua superfície limite ao invés de ter temperatura constante tem *T* dependente do tempo, é necessário o uso de um artifício em que se cria uma fonte “negativa” de calor (ou reservatório de calor) de mesma “potência” mas disposta simetricamente à fronteira. -É o chamado *dubleto*-

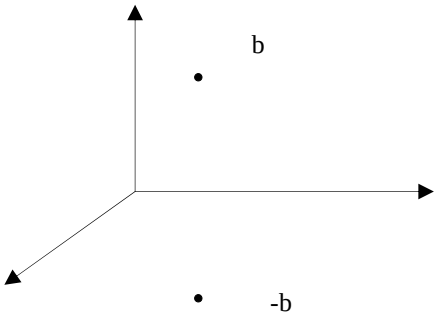


figura C.1 – representação espacial do dubleto

Devemos então encontrar a solução da equação (C.1) com as condições de contorno:

$T = 0$ *quando* $t = 0$ (C.38a)

e

$T = F(t)$ *em* $x = 0$ (C.38b)

Se uma fonte e um reservatório de calor (ou *fonte negativa)* de igual força S são aproximados entre si, mas mantendo constante o produto entre S e a distância $2b$ entre eles, esta combinação, no limite, é chamada de dubleto de força $S_d \equiv 2bS$. Utilizando-se a equação (C.25), podemos escrever a expressão para a temperatura em qualquer ponto x devido ao dubleto instantâneo localizado na origem, com as duas fontes distantes b de cada lado. Isto é:

$$T = \frac{S}{2\sqrt{\pi\alpha t}}\left(e^{\frac{-(b-x)^2}{4\alpha t}} - e^{\frac{-(-b-x)^2}{4\alpha t}}\right) \qquad \text{(C.39)}$$

$$= \frac{S_d}{4b\sqrt{\pi\alpha t}} e^{\frac{-(b^2+x^2)}{4\alpha t}}\left(e^{\frac{bx}{2\alpha t}} - e^{\frac{-bx}{2\alpha t}}\right) \qquad \text{(C.40)}$$

como: $e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + ...$ (C.41)

Fazemos, na equação (C.40), a expansão dos termos $e^{\frac{bx}{2\alpha t}}$ e $e^{\frac{-bx}{2\alpha t}}$, dividimos por *b* e fazemos $b \to 0$.

(o termo em parêntesis torna-se $\frac{x}{\alpha t}$ quando b $\to$0). Assim:

$$T = \frac{S_d x}{4\sqrt{\pi \alpha^3 t^3}} e^{\frac{-x^2}{4\alpha t}} \qquad \text{(C.42)}$$

Em um dubleto permanente de força constante S'_d localizado na origem, com os eixos na direção *x*, temos a composição dos efeitos de cada elemento do dubleto $S'_d\, d\tau$ que agiu previamente no tempo $t\text{-}\tau$, em que τ é a variável de tempo, (limitada entre *0* e *t*); t é o tempo passado desde o início de emissão. Temos então:

$$T = \frac{S'_d x}{4\sqrt{\pi \alpha^3}} \int_0^t e^{\frac{-x^2}{4\alpha(t-\tau)}} (t-\tau)^{-\frac{3}{2}} d\tau \qquad \text{(C.43)}$$

Se, ao invés de termos um dubleto de força constante S'_d tivermos um variável $\psi(t)$:

$$T = \frac{x}{4\sqrt{\pi \alpha^3}} \int_0^t \psi(\tau) e^{\frac{-x^2}{4\alpha(t-\tau)}} (t-\tau)^{-\frac{3}{2}} d\tau \qquad \text{(C.44)}$$

escrevendo:

$$\beta = \frac{x}{2\sqrt{\alpha(t-\tau)}} \quad \text{ou seja} \quad \tau = t - \frac{x^2}{4\alpha\beta^2} \qquad \text{(C.45)}$$

temos:

$$T = \frac{1}{\alpha\sqrt{\pi}} \int_{x\eta}^{\infty} \psi(t - \frac{x^2}{4\alpha\beta^2}) e^{-\beta^2} d\beta \qquad \text{(C.46)}$$

Supondo um dubleto de força $\psi = 2\alpha F(t)$ localizado na origem, temos:

$$T = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{x\eta}^{\infty} F(t - \frac{x^2}{4\alpha\beta^2}) e^{-\beta^2} d\beta \qquad \text{(C.47)}$$

que é uma solução para a equação (C.1) e satisfaz as condições de contorno (C.38a) e (C.38b)

Se a temperatura inicial do solido semi-infinito é *f(x)* ao invés de zero, a solução pode ser obtida somando-se (C.47) à equação:

$$T = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left[\int_{-x\eta}^{\infty} f(\frac{\beta}{\eta} + x) e^{-\beta^2} d\beta - \int_{x\eta}^{\infty} f(\frac{\beta}{\eta} - x) e^{-\beta^2} d\beta \right] \qquad \text{(C.48)}$$

onde $\beta = (\lambda - x)\eta$ (C.49)

Que é a solução de T quando a temperatura inicial do corpo é *f(x)* e na fronteira é zero.

FONTE DE CALOR EM UM PONTO - FLUXO RADIAL DE ENERGIA TÉRMICA – TEMPERATURA INICIAL DADA COMO FUNÇÃO DA DISTÂNCIA AO PONTO

Neste caso, as isotermas ao invés de serem planos, são esféricas. O Laplaciano de T expresso em termos de *r* será:

$$\nabla^2 T = \frac{1}{r}\frac{\partial^2 (rT)}{\partial r^2} \qquad \text{(C.50)}$$

e as equações de Fourier:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\alpha}{r}\frac{\partial^2 (rT)}{\partial r^2} \qquad \text{(C.51)}$$

ou

$$\frac{\partial (rT)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 (rT)}{\partial r^2} \qquad \text{(C.52)}$$

com a condição inicial:

$$T = f(r) \quad \text{quando } t = 0 \qquad \text{(C.53)}$$

Se fizermos $u = rT$ nossa equação diferencial se reduzirá a:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \qquad \text{(C.54)}$$

onde $u = rf(r)$ quando $t = 0$

e $u = 0$ em $r=0$

Se tomarmos *T* positivo, *u* é positivo e a solução é parecida com a equação (C.48).

Usandoλ como variável de integração (e lembrando que, quando $t = 0 \rightarrow \mu = \lambda f(\lambda)$:

$$u = rT = \frac{\eta}{\sqrt{\pi}}\left[\int_0^\infty \lambda f(\lambda) e^{-(\lambda - r)^2 \eta^2} d\lambda - \int_0^\infty \lambda f(\lambda) e^{-(\lambda + r)^2 \eta^2} d\lambda\right] \qquad \text{(C.55)}$$

e com as substituições:

$$\beta = (\lambda - r)\eta \qquad \text{ou} \qquad \lambda = \frac{\beta}{\eta} + r \qquad \text{(C.56)}$$

e... $\beta' = (\lambda + r)\eta$ ou $\lambda = \frac{\beta'}{\eta} - r$ (C.57)

temos:

$$T = \frac{1}{r\sqrt{\pi}}\left[\int_{-r\eta}^{\infty}(\frac{\beta}{\eta}+r)\,f\,(\frac{\beta}{\eta}+r)e^{-\beta^2}d\beta - \int_{r\eta}^{\infty}(\frac{\beta'}{\eta}-r)\,f\,(\frac{\beta'}{\eta}-r)e^{-\beta'^2}d\beta'\right] \qquad \text{(C.58)}$$

Que é a solução de T para uma fonte puntual com a condição de contorno (C.53).

Se a temperatura inicial T_0 é constante, dentro de uma esfera de raio R contida no sólido infinito e zero fora deste raio, a temperatura será dada por:

$$T = \frac{T_0\eta}{r\sqrt{\pi}}\left[\int_0^R \lambda e^{-(\lambda-r)^2\eta^2}d\lambda - \int_0^R \lambda e^{-(\lambda+r)^2\eta^2}d\lambda\right] \qquad \text{(C.59)}$$

ou, com as substituições (C.56) e (C.57):

$$T = \frac{T_0}{r\sqrt{\pi}}\left[\int_{-r\eta}^{(R-r)\eta}(\frac{\beta}{\eta}+r)e^{-\beta^2}d\beta - \int_{r\eta}^{(R+r)\eta}(\frac{\beta}{\eta}-r)e^{-\beta^2}d\beta\right] \qquad \text{(C.60)}$$

cujo resultado dá o valor de T para qualquer ponto, exceto r = 0, onde há uma descontinuidade, mas que pode ser avaliada por diferenciação, o que dá:

$$T_{centro} = T_0\left[\Phi(R\eta) - \frac{2R\eta}{\sqrt{\pi}}e^{-R^2\eta^2}\right] \qquad \text{(C.61)}$$

e a função $\Phi(x)$ é a integral de probabilidade.

FONTES E DEPÓSITOS DE CALOR (**CAR-47**)

Se *Q* unidades de energia térmica são instantaneamente geradas em um ponto no interior de um sólido que está a zero grau, ocorrerá um fluxo radial de calor e a temperatura em qualquer ponto deste corpo poderá ser descrita em termos do tempo (*t*) e da distância (*r*) a partir deste centro -este caso é análogo ao descrito acima, onde tínhamos um fluxo linear a partir de uma fonte instantânea de calor localizada num plano de espessura infinitesimal-. A energia térmica em um ponto P do sólido se espalhando pela vizinhança pode ser entendido da seguinte forma:
suponha uma região com raio R e temperatura inicial T_0. À medida que se diminui o raio R para valores pequenos, próximos de zero, aumenta-se o valor de T_0 de forma que o valor de Q permaneça finito.
Escrevendo Q, a energia térmica em uma esfera muito pequena de raio R, na forma:

$$Q = T_0 c\rho \,{}^{4}\!/_{3}\,\pi R^3 \qquad \text{(C.62)}$$

A solução da equação de Fourier equação (C.50) para um fluxo radial equação (C.59), já substituindo o valor de T_0 encontrado na equação (C.62) dará:

$$T = \frac{3Q\eta}{4c\rho R^3 \pi^{3/2} r}\left(\int_0^R \lambda e^{-(\lambda-r)^2\eta^2}\,d\lambda - \int_0^R \lambda e^{-(\lambda+r)^2\eta^2}\,d\lambda\right) \qquad \text{(C.63)}$$

reescrevendo:

$$e^{-(\lambda-r)^2\eta^2} = e^{-\lambda^2\eta^2} e^{2\lambda r\eta^2} e^{-r^2\eta^2}$$

$$= \left(1-\lambda^2\eta^2+\frac{\lambda^4\eta^4}{2!}-...\right)\left(1+2\lambda r\eta^2+\frac{4\lambda^2 r^2\eta^2}{2!}+...\right)e^{-r^2\eta^2} \qquad \text{(C.64)}$$

Como λ é uma variável de integração muito pequena, limitada entre 0 e R, e R→0, a equação (C.64) pode ser simplificada para:

$$\left(1+2\lambda r\eta^2\right)e^{-r^2\eta^2} \qquad \text{(C.65)}$$

De forma similar, podemos tratar o argumento da segunda integral em (C.63). Então a expressão para T fica:

$$T = \frac{3Q\eta}{4c\rho R^3\pi^{3/2}r} e^{-r^2\eta^2}\left[\int_0^R \lambda(1+2\lambda r\eta^2)d\lambda - \int_0^R \lambda(1-2\lambda r\eta^2)d\lambda\right] \qquad \text{(C.66)}$$

$$= \frac{3Q\eta}{4c\rho R^3\pi^{3/2}r} e^{-r^2\eta^2}\ \frac{4R^3 r\eta^2}{3} \qquad \text{(C.67)}$$

$$T = Q\frac{\alpha}{\kappa}\left(\frac{\eta}{\sqrt{\pi}}\right)^3 e^{-r^2\eta^2} = S\left(\frac{\eta}{\sqrt{\pi}}\right)^3 e^{-r^2\eta^2} \qquad \text{(C.68)}$$

onde lançamos mão da definição de *coeficiente de difusividade* e da equação (C.19). Note que ***T*** tem um valor diferente de zero em todo o espaço, mesmo quando ***t*** é infinitamente pequeno, o que implica que a energia térmica é propagada aparentemente com velocidade infinita. Verdade ou não, o fato é que qualquer distúrbio térmico é transmitido com grande velocidade através do meio, embora esteja continuamente perdendo muita energia para o meio, pois tem que aquece-lo à medida que passa por ele, de forma que a quantidade de

energia transportada pela onda térmica que percorre uma determinada distância em um em um intervalo de tempo muito pequeno seja também pequena.

Da mesma forma que a dedução de (C.28), podemos escrever a expressão para a temperatura a uma distância ***r*** de uma fonte permanente de calor depositando ***Q'*** unidades de energia por segundo, iniciado ***t*** segundos atrás:

$$T = \frac{Q'}{8c\rho\pi^{3/2}\alpha^{3/2}} \int_0^t e^{\frac{-r^2}{4\alpha(t-\tau)}} (t-\tau)^{-3/2} d\tau \qquad \text{(C.69)}$$

Fazendo a transformação da equação (C.45) e trocando ***x*** por ***r***, temos:

$$T = \frac{Q'}{2c\rho\pi\, 3/2\, \alpha r \int_{r\eta}^{\infty} e^{-\beta^2} d\beta} = \frac{Q'}{4\pi\kappa r} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{r\eta}^{\infty} e^{-\beta^2} d\beta \qquad \text{(C.70)}$$

Usando a equação (C.20):

$$T = \frac{S'}{2\pi^{3/2}\alpha r} \int_{r\eta}^{\infty} e^{-\beta^2} d\beta \qquad \text{(C.71)}$$

colocando $t = \infty$ na equação (C.71):

$$T = \frac{S'}{4\pi\alpha r} = \frac{Q'}{4\pi c\rho\alpha r} = \frac{Q'}{4\pi\kappa r} \qquad \text{(C.72)}$$

Que é a temperatura no estado estacionário em um sólido infinito onde ***Q'*** unidades de energia são entregues em um ponto por unidade de tempo.

Se uma fonte permanente, ao invés de ser constante, de "força" $\frac{Q'}{c\rho}$ é substituída por uma de "força" variável ***f(t),*** temos:

$$T = \frac{1}{8\pi^{3/2}\alpha^{3/2}} \int_0^t f(\tau) e^{\frac{-r^2}{4\alpha(t-\tau)}} (t-\tau)^{-3/2} d\tau \qquad \text{(C.73)}$$

ou

$$T = \frac{1}{2\pi^{3/2}\alpha r} \int_{r\eta}^{\infty} f\left(t - \frac{r^2}{4\alpha\beta^2}\right) e^{-\beta^2} d\beta \qquad \text{(C.74)}$$

Para verificarmos se a equação (C.68) satisfaz a equação (C.52),
diferenciamos ***(rT)*** em função de ***t*** e de ***r***:

$$\frac{\partial(rT)}{\partial t} = \left(\frac{-3}{2t} + \frac{r^2}{4\alpha t^2}\right) rT \qquad \text{(C.75)}$$

$$\frac{\partial(rT)}{\partial r} = \left(\frac{1}{r} - \frac{r}{2\alpha t}\right) rT \qquad \text{(C.76)}$$

$$\frac{\partial^2(rT)}{\partial r^2} = \left(\frac{-3}{2\alpha t} + \frac{r^2}{4\alpha^2 t^2}\right) rT \qquad \text{(C.77)}$$

o que verifica a equação (C.52).
Supondo que a quantidade total de energia térmica (em qualquer tempo ***t***) é igual a ***Q***; e levando em conta as condições de contorno:

$$T = 0 \quad \text{quando} \quad t = \infty \qquad \text{(C.78)}$$

$T = 0$ quando $t = 0$ (exceto em $r = 0$) (C.79)

podemos rescrever parte da equação (C.68) que contem ***t***:

$$\frac{1}{t^{3/2} e^{b/t}} = \frac{1}{\left(t^{3/2}\right)\left[1 + \left(b/t\right) + \left(b^2/2!t^2\right) + ...\right]} \qquad \text{(C.80)}$$

Quando $t = 0$ ou ∞, o denominador é infinito, zerando (C.80).
Assim, a quantidade total de energia térmica é dada por:

$$\int_0^\infty \rho c T 4\pi r^2 dr = \int_0^\infty Q\left(\frac{\eta}{\sqrt{\pi}}\right)^3 e^{-r^2\eta^2} 4\pi r^2 dr \qquad \text{(C.81)}$$

substituindo $r\eta = \gamma$ (C.82)

o segundo membro fica:

$$= \frac{4Q}{\sqrt{\pi}} \int_0^\infty e^{-\gamma^2} \gamma^2 d\gamma = Q \qquad \text{(C.83)}$$

verificando portanto a suposição acima.

Para se calcular o tempo t_1 em que a temperatura ***T*** atinge seu máximo, diferencia-se a equação (C.68) em ***t*** e igualando a zero:

$$t_1 = \frac{r^2}{6\alpha} \qquad \text{(C.84)}$$

Com a temperatura correspondente:

$$T_1 = \left(\frac{1}{\sqrt{\frac{2}{3}\pi e}} \right)^3 \frac{Q}{c\rho r^3} \qquad \text{(C.85)}$$

Fonte Linear (Line Source Theory)

Uma fonte linear de calor pode ser pensada como uma série contínua de pontos ao longo de uma linha infinita. A magnitude de cada ponto é ***Q dz***, onde ***Q*** é a energia liberada por unidade de comprimento da linha. Similarmente, sua "força" é ***S dz.*** O efeito desta fonte linear instantânea em um meio infinito, inicialmente em ***T = 0***, em um ponto distante ***r*** da linha, é a soma dos efeitos dos termos da equação (C.68) -vide figura C.2-:

$$T = \int_{-\infty}^{\infty} S \left(\frac{\eta}{\sqrt{\pi}} \right)^3 e^{-\left(r^2+z^2\right)\eta^2} dz \qquad \text{(C.86)}$$

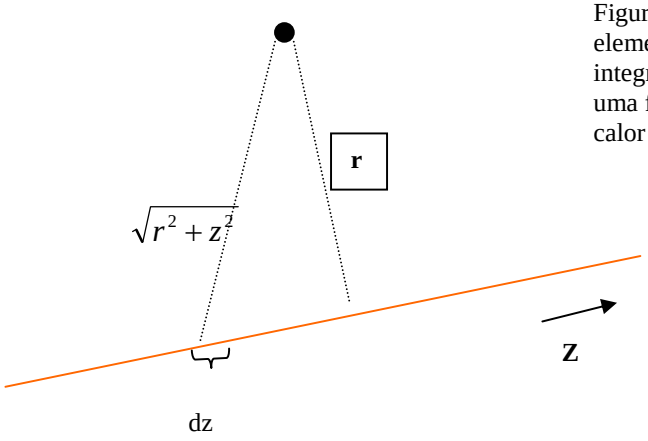


Figura C.2: elemento de integração para uma fonte de calor linear

ou, resolvendo a integral:

$$T = S\left(\frac{\eta}{\sqrt{\pi}}\right)^3 e^{-r^2\eta^2} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-z^2\eta^2} dz = \frac{S\eta^2}{\pi} e^{-r^2\eta^2} \qquad \text{(C.87)}$$

O fluxo de calor a partir de uma fonte puntual em uma fina folha plana (ou lâmina), pode ser considerada como um caso especial de uma fonte linear, -caso não haja perdas por radiação ou outra qualquer em seus lados-, já que o fluxo de calor é normal à fonte, isto é, radialmente no plano. A equação (C.87) é aplicável neste caso se dividirmos a quantidade de energia térmica liberada no ponto pela unidade de espessura, ou seja, por unidade de comprimento da fonte linear.

Se a fonte linear (ou fonte puntual no plano) é permanente e tem início no tempo zero e se o plano (ou meio) está inicialmente em zero, a temperatura em qualquer tempo posterior ***t*** em um ponto qualquer pode ser escrita como:

$$T = \frac{S'}{4\pi\alpha} \int_0^t e^{\frac{-r^2}{4\alpha(t-\tau)}} (t-\tau)^{-1} d\tau \qquad \text{(C.88)}$$

ou, com a transformação:

$$\beta = \frac{r}{2\sqrt{\alpha(t-\tau)}} \qquad \text{(C.89)}$$

Temos:

$$T = \frac{S'}{2\pi\alpha} \int_{r\eta}^{\infty} \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta \equiv \frac{S'}{2\pi\alpha} I(r\eta) = \frac{Q'}{2\pi\kappa} I(r\eta) \qquad \text{(C.90)}$$

onde ***Q'*** é a quantidade de unidades de energia térmica liberadas por unidade de tempo por unidade de comprimento da fonte linear. A integral ***I(rη)*** pode ser calculada por meio de tabelas.

Para se calcular a taxa de energia térmica saindo de um raio r_1, diferencia-se a equação (C.90) com relação a r:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\partial T}{\partial (r\eta)} \frac{\partial (r\eta)}{\partial r} = \frac{-Q'}{2\pi\kappa} \frac{e^{-r_1^2\eta^2}}{r_1\eta} \eta \qquad \text{(C.91)}$$

A taxa de energia térmica saindo por unidade de comprimento do cilindro em um raio r_1 será:

$$q = 2\pi r_1 \kappa \underbrace{\frac{Q' e^{-r_1^2\eta^2}}{2\pi\kappa r_1}} = Q' e^{-r_1^2\eta^2} = S' c\rho e^{-r_1^2\eta^2} \qquad \text{(C.92)}$$

$\boxed{\partial T / \partial r}$

ou, no caso mais geral, dado pela lei de Fourier (**ASH-97**):

$$q = -(kA)\frac{dT}{dr} \qquad \text{(C.93)}$$

onde:

k = condutividade térmica

A = secção de choque (área normal ao fluxo)

dt/dr = gradiente de temperatura

Caso Geral

Podemos resumir os casos acima estudados na equação geral:

$$T = \frac{S\eta^n}{\pi^{n/2}} e^{-r^2\eta^2} \qquad \text{(C.94)}$$

onde ***T*** é a temperatura em um meio inicialmente a zero graus à distância ***r*** da fonte instantânea de "força" ***S*** no tempo ***t*** após a liberação de energia.

n=1 $\rightarrow$fluxo unidimensional

n=2 $\rightarrow$ " bidimensional

n=3 $\rightarrow$ " tridimensional

As equações (C.94) são conhecidas como as soluções fundamentais das equações de condução de calor.

Caso a fonte seja permanente, a temperatura no tempo ***t*** após o início é dada por:

$$T = \frac{S' r^{(2-n)}}{2\pi^{n/2}\alpha} \int_{r\eta}^{\infty} \beta^{(n-3)} e^{-\beta^2} d\beta = \frac{Q' r^{(2-n)}}{2\pi^{n/2}\kappa} \int_{r\eta}^{\infty} \beta^{(n-3)} e^{-\beta^2} d\beta \qquad \text{(C.95)}$$

onde: $\eta = \frac{1}{2\sqrt{\alpha t}}$

$$\alpha = \frac{Q}{c\rho}$$

$$\beta = \frac{r}{2\sqrt{\alpha(t-\tau)}}$$

e ***Q'*** é expresso em:

W, Btu/h ou ***cal/s***, para o caso tridimensional

W/m^2, Btu/h.ft^2 ou ***cal/s.cm^2*** no caso de uma fonte (ou reservatório) plano

W/m, Btu/h.ft ou ***cal/s.cm*** no caso de fonte (ou reservatório) linear.

Somente para ***n=3*** é possível ter-se um estado estacionário. Nos dois outros casos, à medida que t vai para infinito, ***T*** aumenta indefinidamente. Em pontos muito próximos à fonte

plana, a temperatura é aproximadamente proporcional à raiz quadrada do tempo, enquanto para a fonte linear, a dependência é mais lenta.

Se existirem várias fontes de calor em um meio infinito, a temperatura em um determinado ponto será a soma dos efeitos de cada fonte separadamente.

As mesmas transformações feitas nas equações (C.73) e (C.74), quando se passou de uma fonte constante de força constante ***S,'*** para uma variável de força ***f(t),*** são válidas aqui também.

No caso de uma força instantânea, o tempo t_1 no qual a máxima temperatura é atingida no ponto ***r*** é determinada pelo método similar ao utilizado na equação (C.84):

$$t_1 = \frac{r^2}{2n\alpha} \qquad \text{(C.96)}$$

com a correspondente temperatura máxima:

$$T_1 = \frac{S}{\left(r\sqrt{\frac{2\pi e}{n}}\right)^n} \qquad \text{(C.97)}$$

Fonte de Calor para Bombas de Calor:

As bombas de calor servem para o duplo propósito de refrigerar ou aquecer massas (água, ar ou qualquer outra substância). É muito utilizada para fazer o aquecimento de ambientes construídos no inverno e refrigerá-los no verão. Trabalhando no ciclo termodinâmico reverso, como um refrigerador comum, aplicando-se energia para que o equipamento funcione, ela absorve calor a partir de um corpo (ou região) quente e entrega-o no recinto que pretende-se aquecer (operação realizada no inverno). Esta energia transportada de um lado para outro pode ser várias vezes maior que a energia necessária para fazer o dispositivo funcionar, fazendo destes sistemas uma opção mais barata que as de aquecedores de ambiente por efeito Joule.

Nas operações de bombas de calor para aquecimento/refrigeração são necessários meios externos de onde se possam retirar/depositar calor. Em algumas instalações é utilizado o ar externo, em outros são utilizador reservatórios de água (ou mesmo água corrente), mas tem-se tornado muito comum, em países do hemisfério norte, em especial os EUA, a utilização do subsolo como fonte/reservatório de calor. Isto significa a instalação de um considerável comprimento de tubos -geralmente polietileno de baixa densidade, por onde o fluido responsável pelas trocas térmicas irá circular- com bom contato térmico com a terra (ou rocha) no subsolo.

Ao se utilizar a equação para fonte linear, equação (C.90) devemos ter em mente:

a)O tubo deve ser longo o suficiente para que o fluxo de calor seja todo ele normal ao tubo (radial)

b)Ao invés de termos uma fonte/sorvedouro de calor linear, na realidade temos de fato um formato cilíndrico de raio r_1, então devemos recorrer às equações (C.91) e (C.92), uma vez que o problema da fonte linear emitindo/absorvendo Q' unidades de energia térmica por unidade de tempo por unidade de comprimento da fonte é, para valores de r iguais ou superiores a r_1, equivalente àquele da fonte cilíndrica de raio r_1 emitindo $Q'e^{-r_1^2\eta^2}$ unidades de energia por unidade de comprimento do cilindro. Ou seja, as equações (C.91), (C.92) e mais as equações (C.78) e (C.79) são nossas novas condições de contorno. A função $f(r,t) = Q'e^{-r_1^2\eta^2}$ tem a forma característica (em função de t):

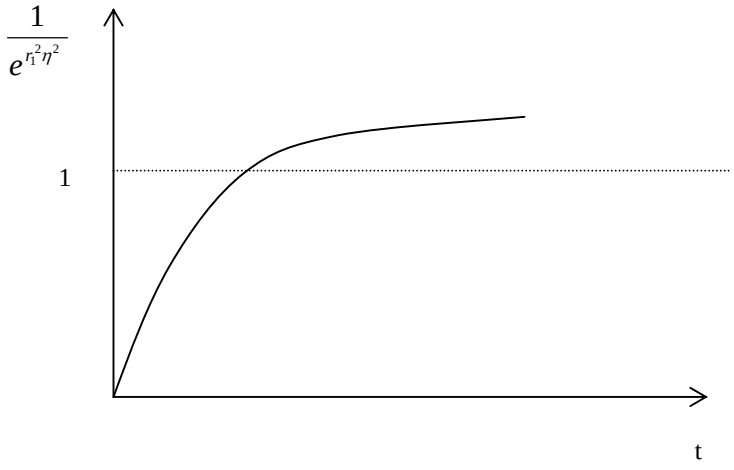


Figura C.3 – Forma característica da ffunção $f(t) = Q'e^{-r_1^2\eta^2}$

Fazendo-se as substituições em t, podemos verificar que a função assume o valor 0,018 após quinze minutos, 0,37 após 1 hora e 0,81 após cinco horas. Após algum tempo, a diferença entre nossa função e um valor fixo de taxa de energia térmica absorvida ***Q'*** torna-se desprezível.

Por outro lado, a dependência em ***r*** tem a forma:

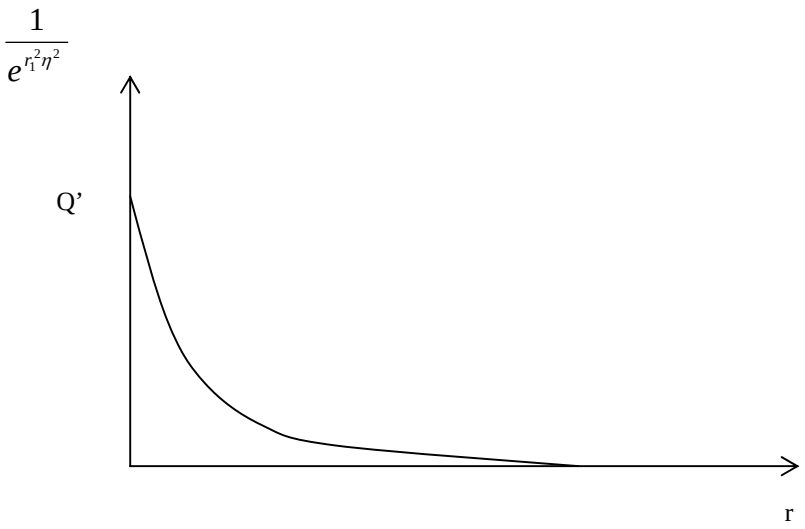


Figura C.4 – Forma característica da ffunção

$$f(r) = Q' e^{-r_1^2\eta^2}$$

O que confirma a idéia de que em uma fonte/receptor de calor bidimensional (linha), a taxa de energia térmica cedida/absorvida é fixa, ***Q'***. Mas à medida que se aumenta o raio, a taxa de energia térmica trocada vai caindo, até chegar a valores desprezíveis para valores muito grandes de ***r***.

A equação (C.90), sujeita às condições acima para $r \geq r_1$ e supondo tubo simples em um meio infinito fornecerá temperaturas iniciais iguais a zero, em qualquer ponto do meio. Se o meio estiver com temperatura inicial acima de zero (digamos 20^0 C), este valor deverá ser somado às temperaturas obtidas com esta equação, deslocando-se a escala de ***T***. Se a temperatura inicial varia com a distância do tubo, o efeito do tubo deve ser adicionado às mudanças que ocorrerão com o tempo devido ao gradiente inicial (ou seja, somamos as duas soluções). Se existem mais que um tubo, a temperatura em um ponto qualquer deverá ser a somatória dos efeitos de cada tubo naquele ponto.

Método da Imagem (especular)

Se um tubo (ou tubos) está próximo à superfície do solo, mantido à zero grau, o problema pode ser resolvido imaginando-se que para cada temperatura positiva (ou negativa) na posição ***x*** existe uma temperatura igual e negativa (ou positiva) na posição ***–x***. Em outras palavras: se existir uma distribuição de energia térmica no lado negativo de ***x*** de valor idêntico e sinal oposto ao do lado positivo, o fluxo de calor deverá ser tal que mantenha a temperatura no plano ***yz*** continuamente com o valor zero. Se a superfície for refratária ao calor, a solução pode envolver a suposição de uma imagem positiva. Se a superfície estiver submetida a variações de temperatura, a temperatura em um determinado ponto será a soma dos efeitos dos tubos , com a superfície mantida a zero graus, mais o efeito da variação sazonal no ponto.

Se ***Q'*** não é constante, mas varia mês a mês, a integral da equação (C.90) deverá ser feita por partes. Por exemplo, se desejamos saber o efeito ao final de 3 meses de operação, utilizamos a soma de 3 integrais, onde ***Q'*** em cada um dos trechos é a média do mês correspondente. Os limites destas integrais será determinado pelo tempo entre o início e fim de cada intervalo.

Apesar do uso muito difundido do ar ou da água como fontes (ou como meio para rejeito) de calor, o meio mais comumente disponível e com o maior potencial como fonte/depósito de calor é o solo -deve-se deixar claro que o uso do solo como fonte/reservatório de calor não tem nenhuma conexão com o chamado "calor interno da Terra". Para obtenção desta fonte, devemos ir a milhares de metros abaixo da superfície-. Em cada metro cúbico de solo comum tem-se uma "capacidade térmica" da ordem de 2.850kJ (2700 Btu ou aproximadamente 680 kcal), ou seja, a quantidade de energia térmica que é obtida com a diminuição de temperatura desta massa de 1 K. Desta forma, pode-se extrair de um bloco de solo de 15 x 15 x 14 m rebaixado em 16^0C (30^0F) o equivalente em calor da combustão de 4 toneladas de carvão! Obviamente que é impraticável a refrigeração de um bloco de terra com estes parâmetros, mas o exemplo serve como ilustração do potencial disponível no solo.

Trocadores de Calor no Solo

Existem dois casos de importância prática que devem ser estudados:

a) Trocadores com temperatura constante na superfície
b) Trocadores com taxa de transferência de calor constante

Neste tratamento, será feito o uso constante do valor ΔT, que é chamado de *diferencial de temperatura* e nada mais é que uma abreviação de $T - T_0$, i. é., a diferença entre a temperatura no ponto em consideração (na maioria dos casos a superfície do trocador) e a temperatura inicial e uniforme do solo.
Dois tipos diferentes de solo serão considerados:

solo *A* :
- κ =1.2 (condutividade térmica) Btu/h.ft.^{0}F
- c = 0.45 (calor específico a pressão constante) Btu/lb ^{0}F
- ρ = 102 (densidade) lb/ft^3
- α = 0.261 (difusividade térmica) ft^2/h

solo B :
- κ =0.4 (condutividade térmica) Btu/h.ft.^{0}F
- c = 0.3 (calor específico a pressão constante) Btu/lb ^{0}F
- ρ = 100 (densidade) lb/ft^3
- α = 0.0133 (difusividade térmica) ft^2/h

Trocador Planar – Superfície Plana e Placa Plana

Consideraremos os dois casos possíveis: uma superfície plana com fluxo de calor perpendicular à superfície e somente na direção positiva de *x* e uma placa plana em que o fluxo se dá nas duas direções: positivo e negativo de *x.* As dimensões são tais que os efeitos de bordas serão desprezados (o arranjo de tubos em um plano, com pequeno espaçamento entre eles pode ser aproximado para um trocador planar)

Caso 1 – Temperatura constante na superfície do trocador

Aqui, a equação para taxa de fluxo de calor por unidade de área torna-se:

$$\omega = \frac{\kappa \Delta T}{\sqrt{\pi \alpha t}} \qquad \text{(C.98)}$$

E, para uma superfície plana mantida ao diferencial de temperatura constante de 1^0F acima ou abaixo da temperatura do solo, a taxa de transferência de calor no *solo A* após 1 semana (168 horas) será de 0.323 Btu/h ft^2 e após dois meses, 0.111 Btu/h ft^2. No *solo B* os valores correspondentes serão: 0.151 Btu/h ft^2 e 0.051 Btu/h ft^2. Na placa plana, os valores de taxa de transferência de calor serão os mesmos para as mesmas dimensões; mas como a placa plana tem o dobro de área de troca, terá o dobro de transferência de calor.

Caso 2 - Taxa de transferência Constante

Neste caso, a variação de temperatura é dada por:

$$\Delta T = \frac{2\omega\sqrt{\alpha t}}{k\sqrt{\pi}} \qquad \text{(C.99)}$$

onde o fator 2ω indica que a placa irradia dos dois lados.

Para um trocador de calor em forma de placa plana de grandes dimensões no solo A, com taxa de transferência de 1 Btu/(h.ft^2) (ou 1.200 Btu/h em uma placa de 20x30 ft) teremos um ΔT de $1{,}97^0$F após uma semana e $5{,}80^0$F após 2 meses; enquanto que para o solo B teremos respectivamente $4{,}20^0$F e $12{,}4^0$F. Estas curvas são apresentadas na figura C.5

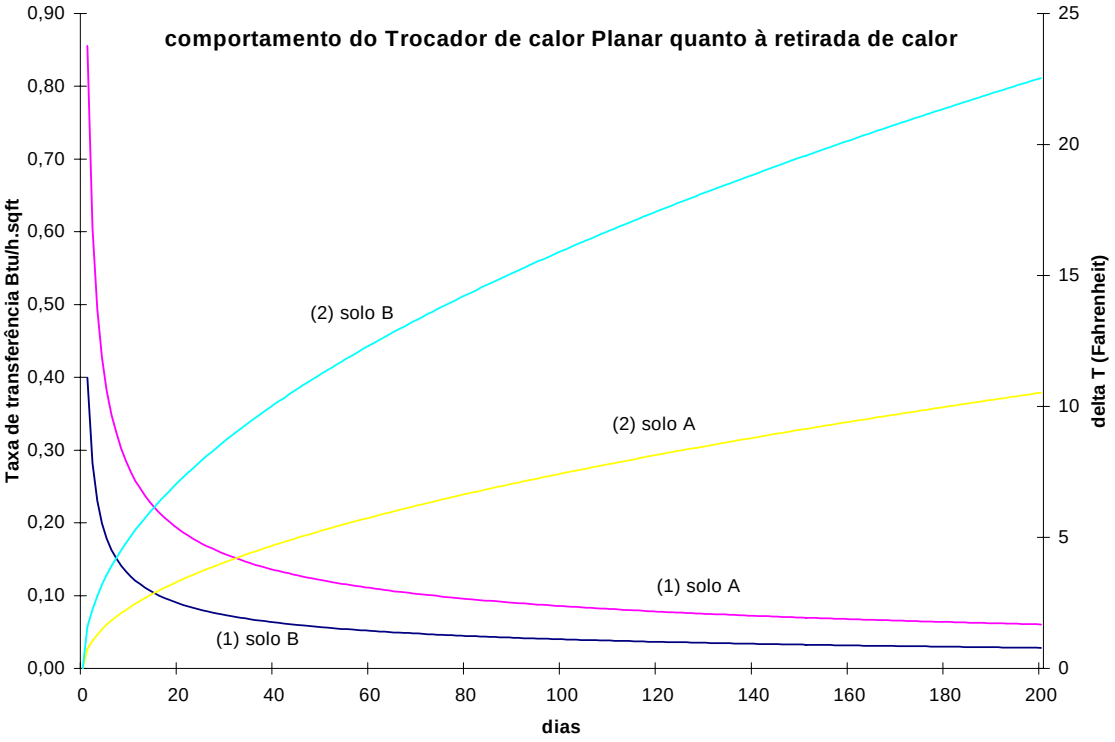


Figura C.5 Trocador de calor Planar- Taxa de transferência de calor com da superfície de troca a temperatura constante e diferença de temperatura a taxa de troca constante. Curvas (1) escala esquerda : taxa de transferência ω em função da diferença de temperatura (diferença de temperatura entre a superfície do trocador e a temperatura inicial do solo) $\Delta T = 1^0F$
Curvas (2) escala direita: Diferença de temperatura (ΔT) em função de taxa de transferência ω = 1 Btu/h.sqft.
Parâmetros: solo a: k=1,2; c=0,45; ρ=102; α=0,0261; solo B: k = 0,4; c=0,3; ρ = 100; α = 0,0133

Trocador de calor Esférico (ou cavidade esférica)

Caso 1: Temperatura constante na superfície da cavidade

A equação para o trocador de calor em forma de cavidade esférica é dada pela equação:

$$q = 4\pi\kappa R\Delta T\left(1+\frac{R}{\sqrt{\pi\alpha t}}\right) \qquad \text{(C.100)}$$

e A taxa de transferência é calculada como:

$$w = \frac{q}{4\pi R^2} \qquad \text{(C.101)}$$

Por exemplo, para uma cavidade de raio = 10 ft e $\Delta T = 1^0F$, a taxa de transferência no solo A depois de uma semana é de q = 557Btu/h; w = 0,443Btu/h.sqft e, depois de dois meses, 288Btu/h e 0,229Btu/h.sqft respectivamente . Para o solo B, os valores correspondentes serão:240 e 0,191 e 114 e 0,091.

Caso 2: Taxa de Transferência Constante

A temperatura em um ponto intermediário *r* distante do centro em uma cavidade de raio R (*r*>R), no qual a transferência de calor para o meio é dado à taxa *q*, difere da inicial de uma quantidade ΔT dada por:

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi\kappa r}\left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{r-R}{2\sqrt{\alpha t}}}^{\infty} e^{-\beta^2} d\beta - e^{\frac{r-R}{R}+\frac{\alpha t}{R^2}} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{r-R}{2\sqrt{\alpha t}}+\frac{\sqrt{\alpha t}}{R}} e^{-\beta^2} d\beta \right) \qquad \text{(C.102)}$$

quando r = R, a equação (C.102) reduz-se a:

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi\kappa R}\left(1 - e^{\frac{\alpha t}{R^2}} . \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\sqrt{\alpha t}}^{\infty} e^{-\beta^2} d\beta \right) \qquad \text{(C.103)}$$

Para uma cavidade[1] equivalente ao caso 1 e taxa de transferência na superfície da cavidade (usando a equação (C.102)) de 1 Btu/h.sqft, no solo A, após 1 semana, Δt será de $1{,}65^0$F e depois de 2 meses, de $3{,}65^0$F. No solo B, os valores são, respectivamente: $3{,}70^0$F e $8{,}80^0$F.

Deve-se notar que somente na cavidade esférica é possível chegar realmente ao estado estacionário, diferentemente do trocador planar infinito ou do tubo longo isolado. Pela equação (C.103) podemos observar que o trocador esférico pode chegar a um verdadeiro estado estacionário (quando t é muito grande e que no exemplo dado, pode ser obtido em poucos anos). Na realidade, para os dois outros tipos de trocadores -planar infinito e tubo longo e isolado-, não existe um estado estacionário "verdadeiro".

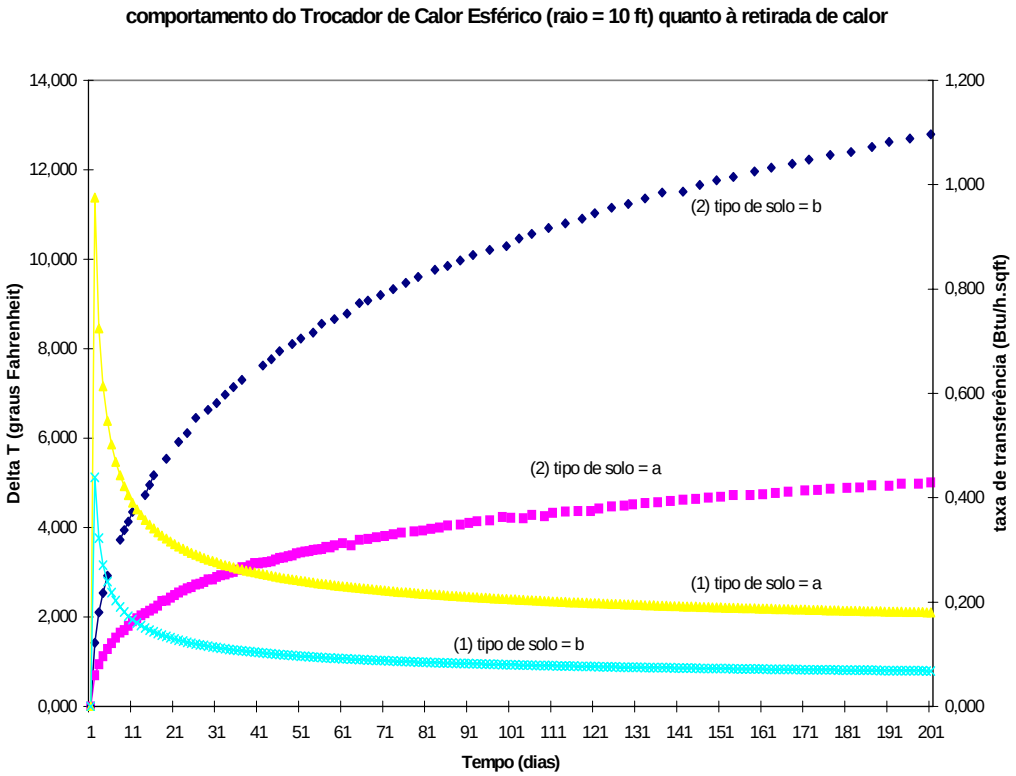


Figura C.6 : Trocador de calor esférico a taxa constante de troca de calor em sua superfície (caso 1) e diferença de temperatura a taxa constante (caso 2).
Caso 1: (escala à esquerda) taxa de transferência (w) quando $\Delta t = 1\ ^0$F.
Caso 2: (escala à esqueda) diferença de temperatura (Δt) quando a taxa de transferência (w = 1 Btu/h.sqft

[1] a equação (102) pode ser rescrita como: $\frac{\sqrt{\pi}}{2} - \int_0^{\frac{\sqrt{\alpha t}}{R}} e^{-\beta^2} d\beta$, cuja integral, chamada integral de probabilidade, é tabelada.

Trocador em forma de Tubo longo

Caso 1: Temperatura da superfície do tubo constante

A teoria para o caso de troca térmica em um tubo longo e isolado foi demonstrada por Jaeger (JAE-42) e Carslaw (CAR-47). A taxa de troca de energia térmica, Q'(Btu/h.ft), para um tubo longo e isolado mantido a um ΔT constante -acima ou abaixo da temperatura do solo- é dado por:

$$Q' = \kappa \Delta T F(z) \qquad \text{(C.104)}$$

e a taxa de calor por unidade de área w (Btu/h.sqft):

$$\omega = \frac{\kappa \Delta T}{2\pi R} F(z) \qquad \text{(C.105)}$$

onde:

$$z = \alpha T \Big/ R^2 \qquad \text{(C.106)}$$

$$F(z) = \frac{8}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{e^{-z\beta^2}}{J_0^2(\beta) + Y_0^2(\beta)} \cdot \frac{d\beta}{\beta} \qquad \text{(C.107)}$$

onde:

$$J_0(\beta) = 1 - \frac{\beta^2}{2^2} + \frac{\beta^4}{2^2.4^2} - \frac{\beta^6}{2^2.4^2.6^2} + ... \qquad \text{(C.108)}$$

é chamada de função de Bessel de primeira classe de ordem zero.

e:

$$Y_0(\beta) = \lim_{p \to 0} \frac{J_p(\beta)\cos p\pi - J_{-p}(\beta)}{\text{sen } p\pi} \qquad \text{(C.109)}$$

é chamada de função de Bessel de segunda classe de ordem zero - ou de função de Weber ou ainda de função de Neumann. Neste caso, designada por $N_0(\beta)$) (**SPI-92**).

As funções F(z) da equação (C.107) podem ser encontradas em tabelas.

Como exemplo de cálculo, suponhamos um tubo de 4 in de diâmetro (ou r=0,167 ft) e $\Delta T=1^0F$. No solo A, teremos, para Δt = 1 dia (24h):

Q'=3,4Btu/h.ft
w = 3,23 Btu/h.sqft
Em 30 dias, os valores serão:
Q'=1,98 Bt/h.ft
w = 1,88 Btu/h.sqft

O gráfico abaixo mostra as curvas de transferência de calor em função do tempo, para dois diâmetros de tubos e os dois tipos de solo acima descritos:

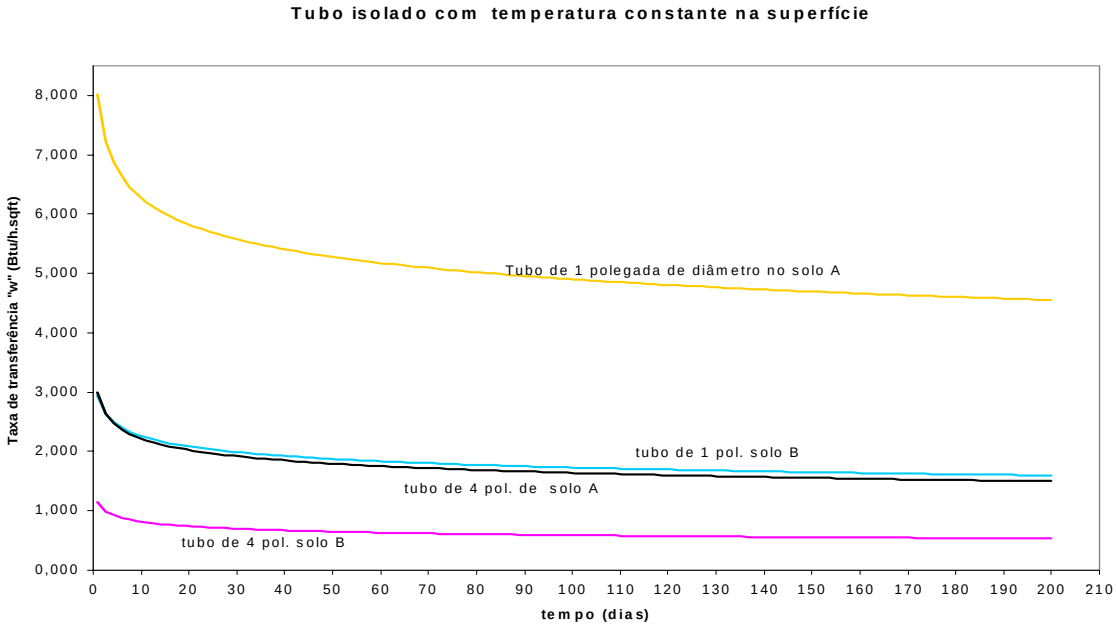


Figura C.7 Curvas de taxa de transferência de calor em função de t, para 2 diâmetros de tubo e dois tipos de solo

Caso 2 Taxa de Transferência de Calor constante

Como já demonstrado, a equação que descreve este caso é a equação (C.90):

$$\Delta T = \frac{S'}{2\pi\alpha}\int_{r\eta}^{\infty}\frac{e^{-\beta^2}}{\beta}d\beta \equiv \frac{S'}{2\pi\alpha}I(r\eta) = \frac{Q'}{2\pi\kappa}\int_{\frac{r}{2\sqrt{\alpha t}}}^{}\frac{e^{-\beta^2}}{\beta} = \frac{Q'}{2\pi\kappa}I(\frac{r}{2\sqrt{\alpha t}}) \qquad \text{(C.90)}$$

Esta equação é apropriada para os casos em que o tempo é bastante longo e o diâmetro do tubo pequeno. Caso contrário (tempo pequeno e ϕ grande - em geral quando $\alpha t/R^2 < 20$ - , o uso da equação de “fonte de calor linear” contém uma discrepância apreciável. Jaeger (**JAE-42**) apresenta um desenvolvimento matemático que, apesar de mais complicado, cobre todos os casos.

Para um tubo transferindo calor à taxa de Q’ Btu/h.ft, a diferença de temperatura (ΔT) entre a temperatura inicial do solo e o ponto sob consideração é dado por:

$$\Delta T = \frac{Q'}{\kappa}G(z,p) = \frac{2\pi R\omega}{\kappa}G(z,p) \qquad \text{(C.110)}$$

onde:

$$G(z,p) = \frac{1}{\pi^2}\int_0^{\infty}\frac{e^{-\beta^2 z}-1}{J_1^2(\beta)+Y_1^2(\beta)}\left[J_0(p\beta)Y_1(\beta) - J_1(\beta)Y_0(p\beta)\right]\frac{d\beta}{\beta^2} \qquad \text{(C.111)}$$

$$z = \alpha t/R^2 \qquad \text{(C.112)}$$

e:

$$p = r/R \qquad \text{(C.113)}$$

ou seja, quando p=5 estamos avaliando a temperatura no ponto distante 5R do centro do tubo. Os valores para p=1 são os da superfície do tubo.

Os valores de G(z,p) também podem ser encontrados em tabelas, para vários valores de z e para p=1,2,5 e 10.

A Figura C.8 mostra as curvas calculadas a partir da "line source theory" – equação (C.90)

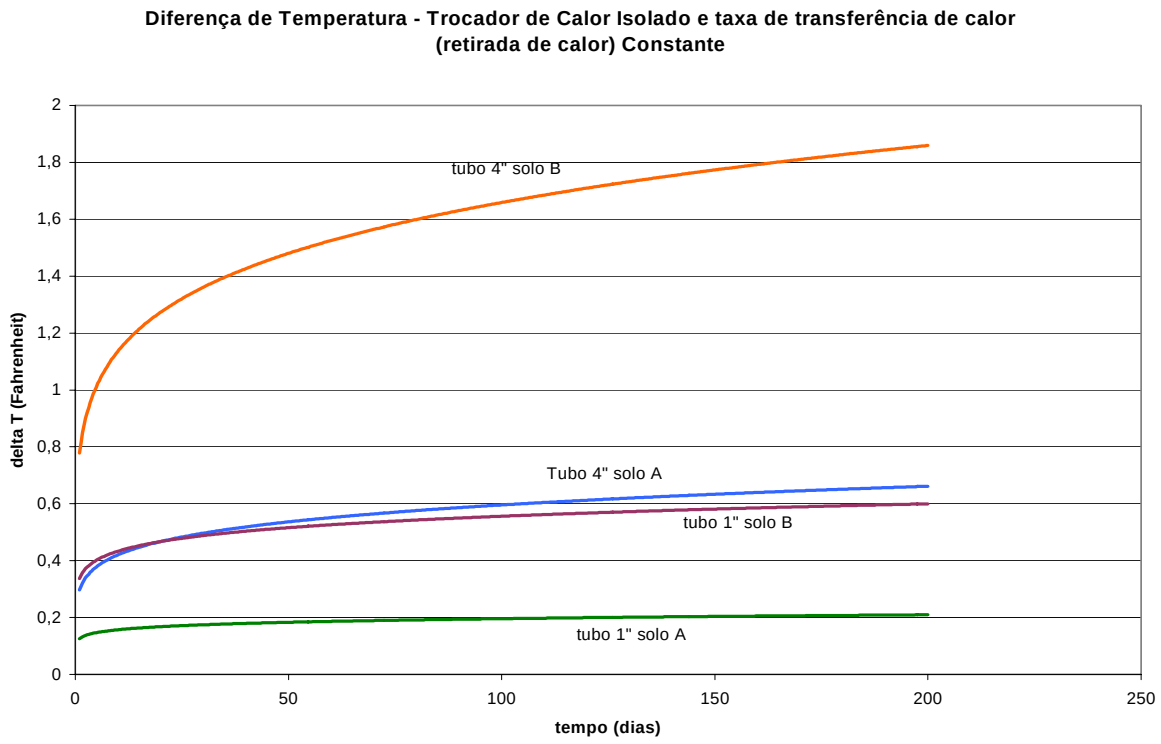


Figura C.8 Curvas de diferença de temperatura do solo para dois tipos de tubo e dois tipos de solo

Na figura C-9 é feita uma comparação entre a "line source theory" e as integrais mais precisas desenvolvidas por Jaeger – equação (C.110)- em um período de 48 horas. Nota-se

que para os solos estudados -que representam um intervalo extenso de tipos de solo- e para tubos de até 4” de diâmetro, os períodos maiores que 1 dia fornecem resultados da “line source” muito próximos das integrais de Jaeger -os erros não excedem a ordem de 2%-. A rigor, o critério para erro igual ou menor que 2% é: $\alpha t / R^2 > 20$. Este critério em geral funciona também para pontos distantes do tubo (R permanecendo como raio do tubo).

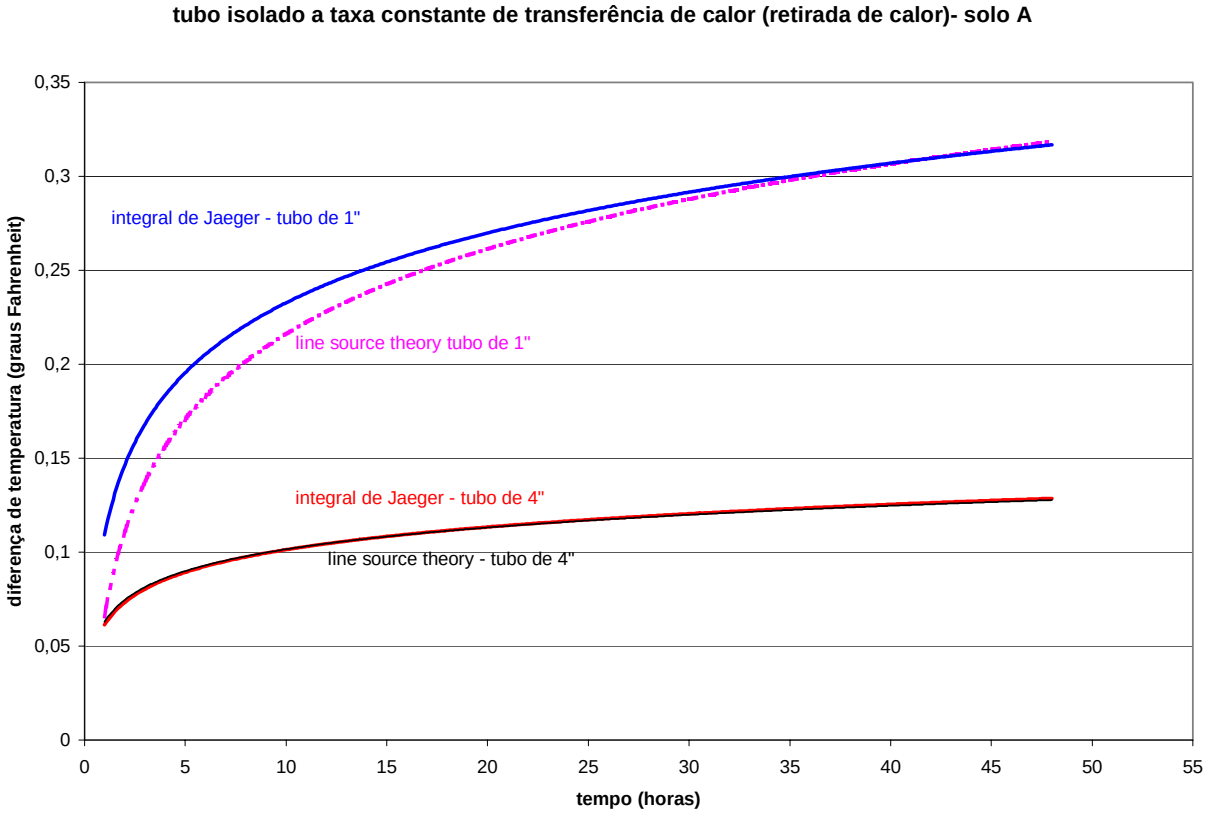


Figura C-9 Comparação entre os resultados de diferença de temperatura entre a “line source equation” e as integrais de Jaeger para tubos longos, isolados e taxa de transferência de calor constante Q’ =1 Btu/h.ft.

Cabe observar que toda esta teoria desenvolvida aplica-se somente no caso de tubo infinitamente longo. Quando se utiliza comprimentos de tubo usuais, é importante avaliar a magnitude das discrepâncias envolvidas.

Tubos curtos

A diferença de temperatura em um ponto distante r de uma fonte puntual em um tempo t após o início de emissão (ou absorção) de q unidades de energia térmica por unidade de tempo é dado pela equação (C.70):

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi\kappa r}\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_{\frac{r}{2\sqrt{\alpha t}}}^{\infty} e^{-\beta^2}\,d\beta \qquad \text{(C.70)}$$

Em uma fonte linear alinhada com a direção *z*, emitindo Q' unidades de energia térmica por unidade de tempo por unidade de comprimento, a diferença de temperatura à distância R - na superfície do tubo por exemplo- desta linha é:

$$\Delta T = \frac{Q'}{4\pi\kappa}\int_{z_1}^{z_2}\frac{dz}{\sqrt{z^2+R^2}}\int_{\frac{\sqrt{z^2+R^2}}{2\sqrt{\alpha t}}}^{\infty}\frac{2}{\sqrt{\pi}}e^{-\beta^2}\,d\beta \qquad \text{(C.114)}$$

Quando esta equação é aplicada à temperatura da superfície do tubo, é de boa acurácia (ou exatidão) somente no caso $\alpha t/R^2$ >20 -da mesma forma que na equação de "line source"-

Se ($\frac{\sqrt{z^2+R^2}}{2\sqrt{\alpha t}} < 1$, a equação (C.114) toma a forma:

$$\Delta T = \frac{Q'}{4\pi\kappa}\left\{\ln\frac{z_2+\sqrt{z_2^2+R^2}}{z_1+\sqrt{z_1^2+R^2}} - \frac{1}{\sqrt{\pi\alpha t}}\left[\begin{array}{l}\left(1-\frac{R^2}{12\alpha t}+\frac{R^4}{160\alpha^2t^2}-....\right)(z_2-z_1)+\\ \left(-\frac{1}{12\alpha t}+\frac{2R^2}{160\alpha^2t^2}-....\right)\frac{(z_2^3-z_1^3)}{3}+\\ \left(\frac{1}{160\alpha^2t^2}+...\right)\frac{(z_2^5-z_1^5)}{5}...\end{array}\right]\right\} \text{.....(C.115)}$$

Em casos normais, quando R $< \frac{L_p}{10}$ (onde L_p é o comprimento do tubo), e $L_p < \sqrt{\alpha t}$ - condição que acarreta um erro menor que 1%. Se $L_p = 2\sqrt{\alpha t}$ este erro sobe para 3%-, a equação (C.115) reduz-se a:

$$\Delta T = \frac{Q'}{4\pi\kappa}\left(4{,}6\log\frac{L_p}{R} - \frac{L_p}{\sqrt{\pi\alpha t}}\right) \qquad \text{(C.116)}$$

que é a diferença de temperatura na superfície próxima ao centro do tubo finito. Esta equação pode fornecer, por exemplo, a temperatura na superfície próxima ao centro de um tubo de 2 polegadas e comprimento de 1 metro, após poucos dias de operação, com um erro desprezível.

Embora não exista um estado estacionário de temperatura no caso de um tubo isolado infinito, ele é possível no tubo finito, embora leve um tempo substancial para chegar a este estado. Colocando-se t = ∞ na equação (C.114) ou na (C.115), obtém-se:

$$\Delta T = \frac{Q'}{4\pi\kappa}\int_{z_1}^{z_2}\frac{dz}{\sqrt{z^2+R^2}} = \frac{Q'}{4\pi\kappa}\ln\frac{z_2+\sqrt{z_2^2+R^2}}{z_1+\sqrt{z_1^2+R^2}} \qquad \text{(C.117)}$$

As curvas relativas às três situações consideradas são mostradas na figura C-10.

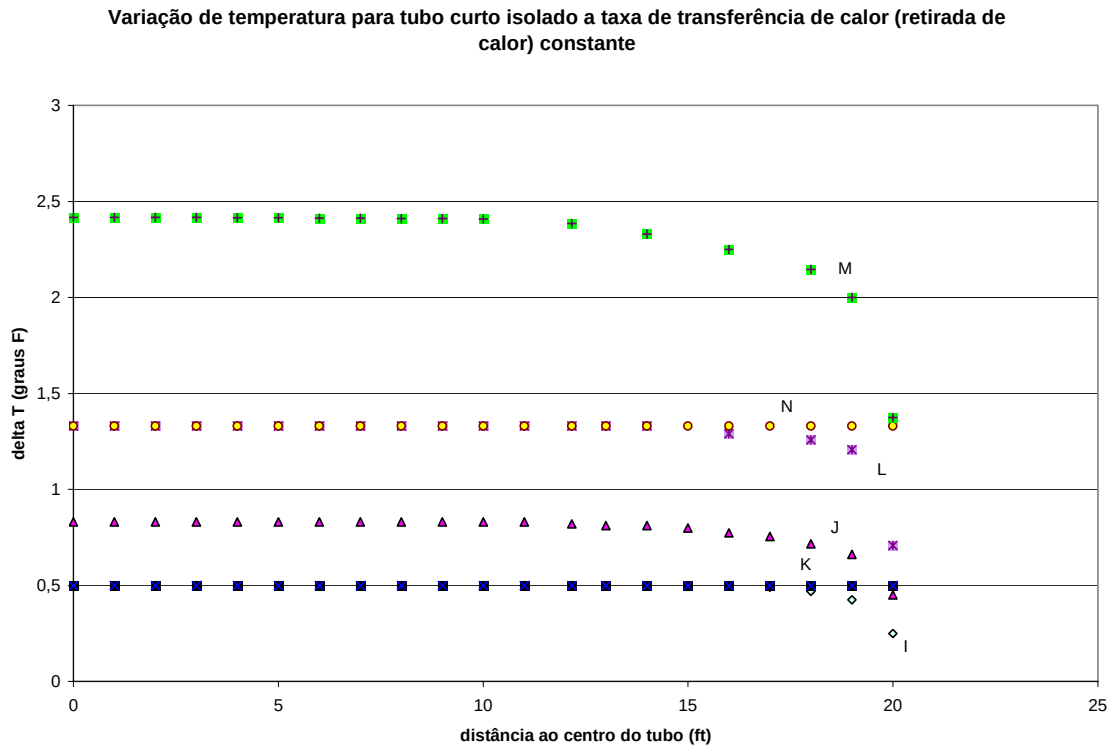


Figura C.10 Diferença de temperatura para tubo trocador de calor curto e isolado, a taxa de transferência de calor constante (Q'=1 Btu/h.ft). Diâmetro do tubo = 2 polegadas. Comprimento do tubo = 40 pés (12,2 metros) comparado com tubo infinito de mesmo diâmetro. As seqüências de pontos dão a diferença de temperatura para pontos sobre a superfície do tubo em várias distâncias a partir do meio, com as seguintes condições: SOLO A : seqüência I= 168 horas; J = estado estacionário; K = tubo infinito; SOLO B: L = 168 horas; M = estado estacionário; N = tubo infinito. As constantes do solo são as mesmas definidas para se avaliar os trocadores planares e esféricos

Pode-se notar na figura C.10 que os casos estudados após 168 horas de iniciada a operação de troca de calor, as quedas (ou subidas) de energia no tubo são praticamente as mesmas do tubo infinito, exceto nos últimos 30 centímetros (ou 1 pé) da extremidade do tubo. Isto mostra que a teoria aplicada ao tubo infinito pode ser aplicada com boa aproximação para tubos longos. Pode-se notar também a distância entre os valores do tubo após 168 horas quando comparado com o estado estacionário, sugerindo que o tempo necessário para se chegar a este estado é muito grande.

Comparação entre os Trocadores

Para efeito comparativo entre os diferentes tipos de trocadores de calor estudados, é mostrado na figura C.11 o comportamento de cada um deles quanto à taxa de transferência de calor por área (w) de trocador. Para isto, estão plotados juntos os trocadores: planar, cavidade esférica e tubos de 1" e 4".

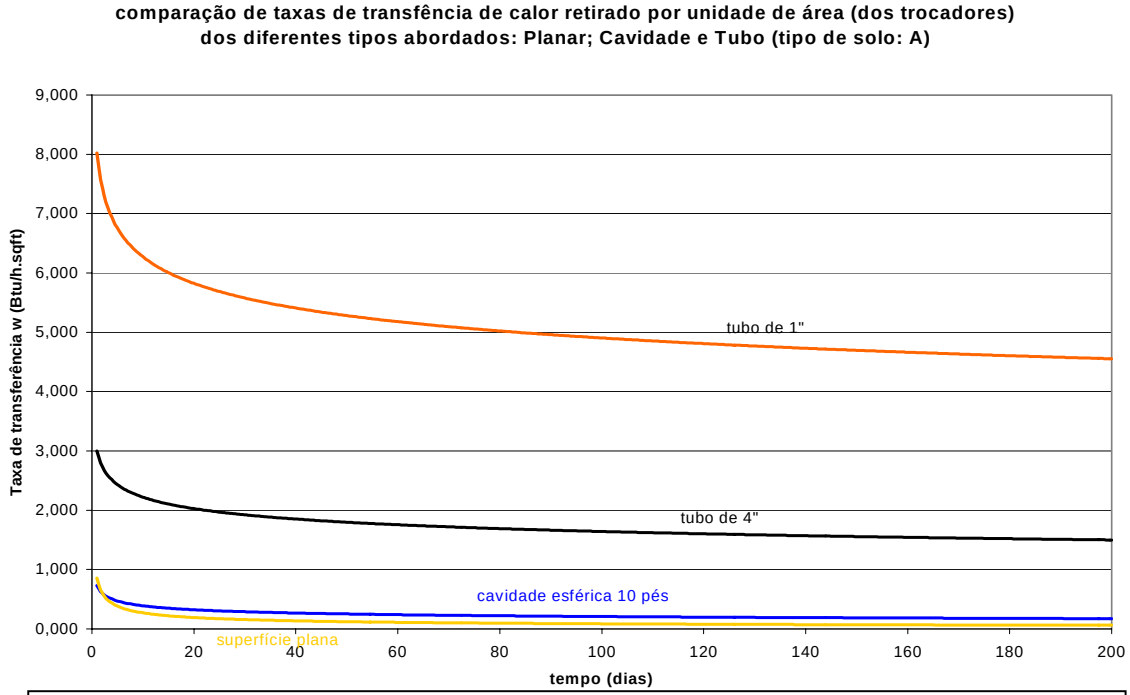


Figura C.11 Comparação de taxa de transferência de calor por unidade de área (w) para três tipos de trocadores: planar, cavidade esférica e tubos longos e isolados de 1" e 4", a temperatura constante na superfície. Diferença de temperatura $\Delta T = 1\ ^0F$.

A superioridade dos tubos trocadores de calor é evidente, não só devido à alta taxa de troca de calor mas também porque a redução da taxa de transferência de calor com o tempo é menor. As comparações nesta figura são feitas tomando-se como base a taxa de transferência por unidade de área de cada trocador. Caso se deseje comparar 2 tipos de tubo, tomando por padrão a taxa de transferência por comprimento linear , basta multiplicar o valor dado em área por π vezes o diâmetro do tubo. Desta forma, podemos verificar que após 6 meses, a taxa de transferência de calor por unidade de comprimento (Q') do tubo de 4"será da ordem de 1,25 vezes maior que o Q' do tubo de 1". Se neste mesmo gráfico também estivessem plotadas as curvas para o solo B (que não consta aqui para não dificultar visualização do gráfico), veríamos que, após o primeiro dia, esta diferença seria maior ainda (aproximadamente 1,7). Daí conclui-se que, ao utilizar tubos de pequeno diâmetro, é conveniente preencher-se o vão no entorno do tubo com um material com a mais alta condutividade possível, além de garantir a boa aderência com o solo.

Efeito da Temperatura na Superfície do Solo

Até o momento, os trocadores de calor estudados não têm recebido influência da superfície do solo. Mas como discutido anteriormente, se o trocador de calor é posicionado a uma profundidade pequena, em que haja efeito desta superfície de separação entre os meios, deve-se lançar mão do **Método de Imagem** (negativa) do trocador -neste caso, tubular-, tomando-se a superfície limítrofe como espelho. Como exemplo, pode-se supor um trocador tubular (2,54 cm de diâmetro, ou 1") que absorve energia térmica a uma taxa constante de 20 Btu/h.ft, enterrado a uma profundidade de 76 cm (30") abaixo da superfície do solo A. O solo está inicialmente a uma temperatura de 10^0C e sua superfície é mantida constantemente a 10^0C. Para se calcular a temperatura do solo depois de seis meses, deve-se fazer a diferença de duas integrais, a primeira em r = $2{,}54/2$ (1/2") e a segunda em r = 152,4 cm (60"):

$\Delta T = -15{,}8 + 3{,}2 = -12{,}6^0$F

ou seja, uma temperatura final de $50 - 12{,}6 = 37{,}4^0$F

Sem esta correção, o valor obtido seria : 50 – 15,8 = 34,2^{0}F, portanto, mais de 3^{0}F abaixo do valor com as correções.

Observação importante: a integral I(x) = $\int_{\frac{r}{2\sqrt{\alpha t}}}^{\infty} \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta$ quando $r/2\sqrt{\alpha t} < 0{,}2$ (caso mais comum) se reduz a: I(x) = $\ln\frac{1}{x} + \frac{x^2}{2} - \frac{x^4}{8} - 0{,}2886$, cuja curva é demonstrada na figura C.12. Na figura C.13 é mostrada a dependência de I(x) x t.

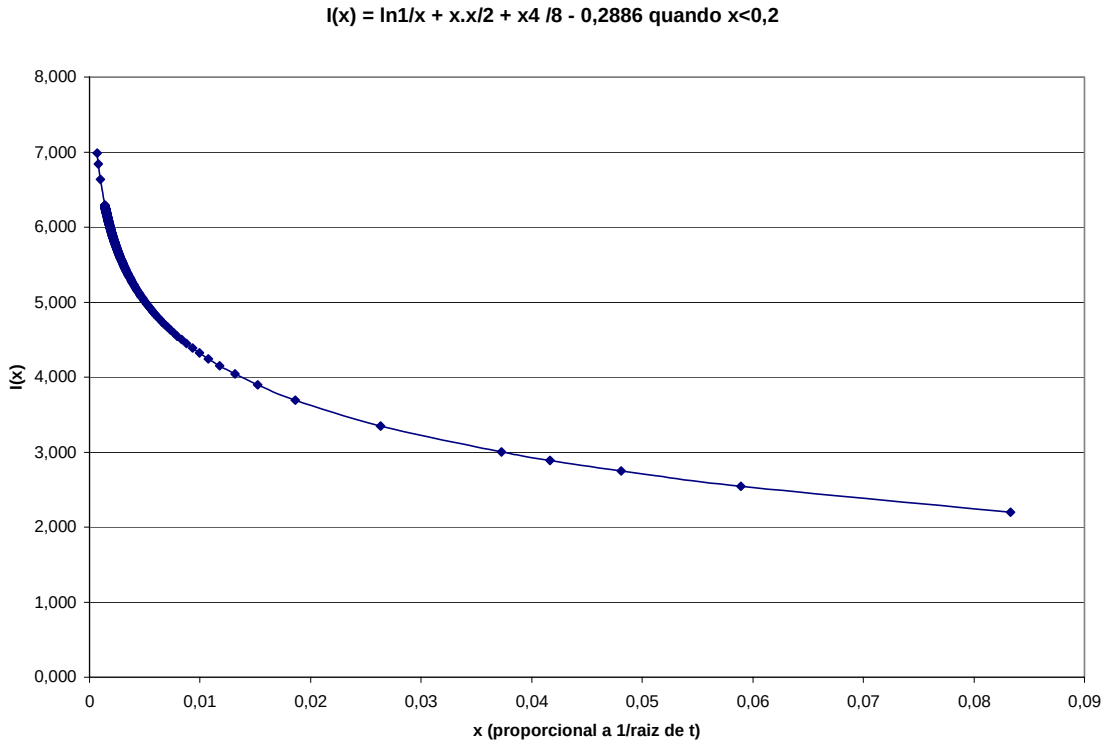


Figura C.12 Comportamento da Integral I(x) em função de x quando x < 0,2

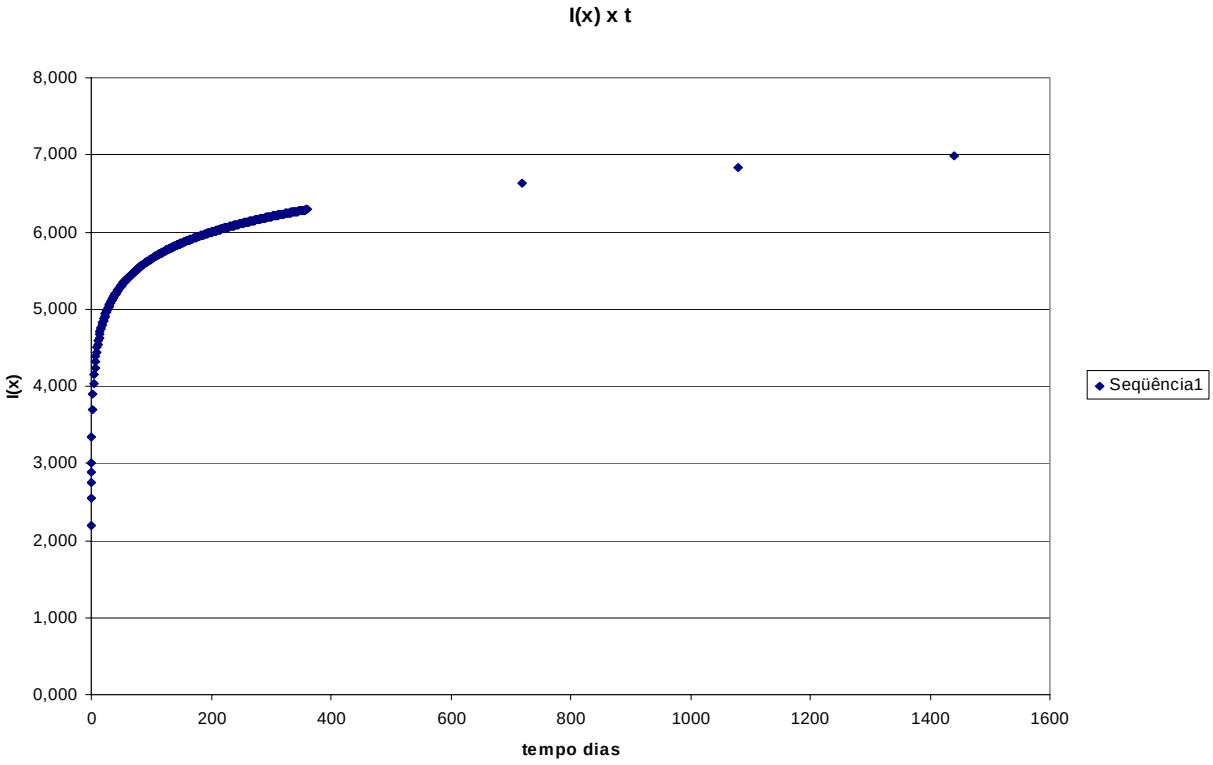


Figura C.13 Comportamento da Integral I(x) em função do tempo

Taxa de Troca de Calor Variável

Até o momento, o tratamento dado aos sistemas de troca de calor com o solo tem considerado taxas de troca de calor ou diferenças de temperaturas constantes com o tempo, mas como o clima é bastante variável ao longo dos dias e ao longo do ano, os sistemas de troca de calor também não devem operar sempre com a mesma taxa de troca de calor. Muito embora seja possível encontrar-se intervalos de dias em que as condições médias são muito parecidas, as condições ao longo do ano podem variar consideravelmente. A solução é partir a integral em duas ou mais integrais que representem os intervalos em que as condições térmicas são semelhantes.

Como exemplo, tomemos um trocador isolado nas mesmas condições que o exemplo anterior, depositando energia térmica à taxa de 15 Btu/h.ft durante um mês e, logo após, 30

Btu/h.ft no mês subsequente. A variação de temperatura pode ser obtida pelo cálculo de ΔT para o intervalo inteiro de 60 dias com 15 Btu's, subtraindo 15 Btu's dos 30 dias restantes em que não foi aplicada esta ação e somando-se os 30 Btu's referentes a este intervalo de tempo equação (C.90):

$$\Delta T = \frac{15}{2\pi 1,2} \int_{\frac{0,0417}{2\sqrt{0,0261.60.24}}}^{\infty} \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta \; - \; \frac{15}{2\pi 1,2} \int_{\frac{0,0417}{2\sqrt{0,0261.30.24}}}^{\infty} \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta + \frac{30}{2\pi 1,2} \int_{\frac{0,0147}{2\sqrt{0,0261.30.24}}} \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta =$$

$$=1,99\left[\int_{0,0034}^{\infty} \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta - \int_{0,0048}^{\infty} \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta \right] + 3,98 \int_{0,0048}^{\infty} \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta \; = 20,8^0\text{F}$$

ou seja, um aquecimento de $20,8^0$F ou uma temperatura final de $70,8^0$F.

Em uma situação ideal, além de termos que levar em conta a demanda por retirada ou deposição de energia térmica -que pode variar ao longo de toda uma estação climática-, o efeito da superfície de fronteira entre o solo e ar também deve ser considerado. Como esta variação de temperatura do solo e do ambiente são sinódicas com o tempo, o comportamento da temperatura do solo após a intervenção do sistema de troca térmica deve-se manter também sinódica com o tempo. A variação de temperatura do ar x tempo ao longo do ano, pode ser representada por:

$$T = T_0 \,\text{sen}(wt) \qquad \text{(C.118)}$$

onde: T_0 é a amplitude máxima da temperatura numa determinada localidade

w = $2\pi / P$

e P = período de variação do tempo (neste caso, 1 ano)

Para saber a temperatura no subsolo devido às variações sinódicas do tempo, devemos acrescentar uma atenuação que atua sobre a amplitude da onda, diminuindo-a com o

aumento da profundidade alem de uma defasagem no tempo, devido ao aumento de massa a ser considerado:

$$T = T_0 e^{-x\sqrt{w/2\alpha}} \operatorname{sen}(wt - x\sqrt{w/2\alpha}) \qquad \text{(C.119)}$$

Como exemplo, podemos observar na figura C.14 as curvas esperadas para o subsolo de São Paulo, a 2 metros de profundidade, com extremos de temperatura de 32^0C e 8^0C e média anual em torno de 20^0C.

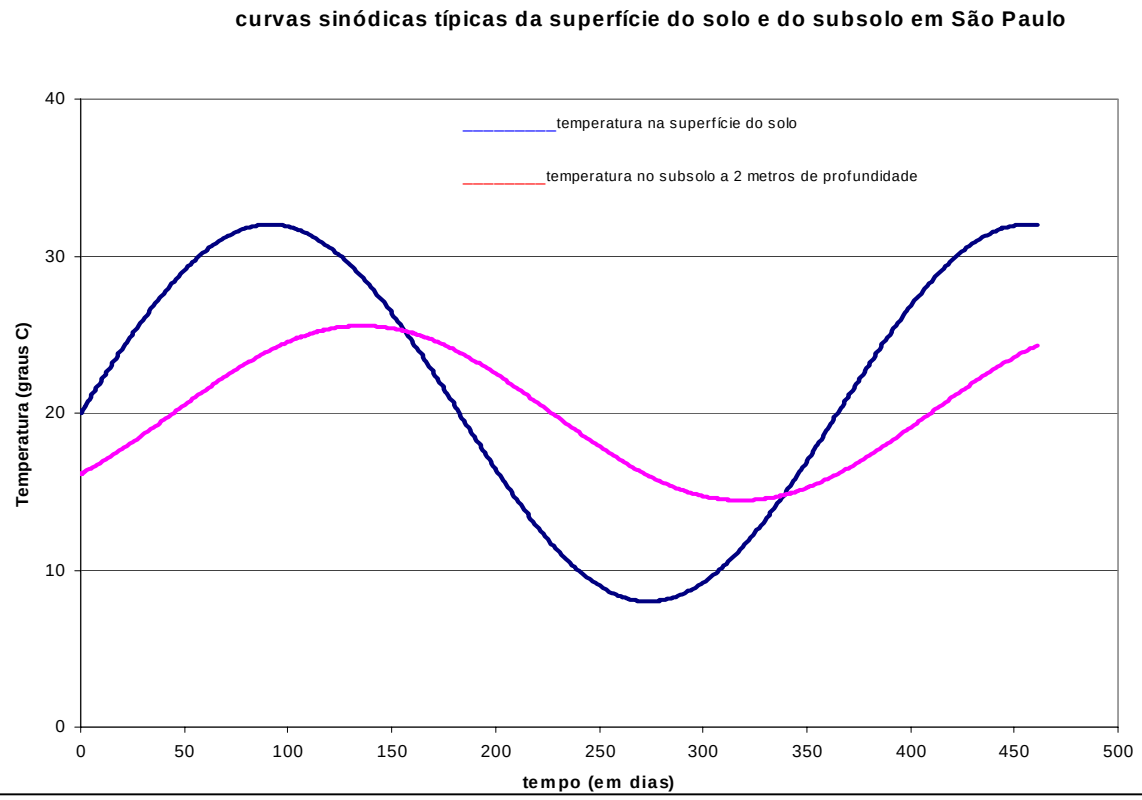


Figura C.14 Comportamento típico da temperatura da superfície do solo e a resposta do subsolo, a 2 metros de profundidade, na cidade de São Paulo, calculado a partir da equação (C.119)

Somando-se os efeitos de taxas de absorção (ou deposição) de energia térmica variáveis, do efeito de superfície e da variação sinódica da temperatura ao longo do ano, pode-se calcular o comportamento esperado da temperatura do subsolo para qualquer tipo e em qualquer região do planeta, desde que se conheçam os parâmetros necessários. Seja, por exemplo, um tubo de 2,5 cm de diâmetro (1 polegada) enterrado a 1,83 metros (6 pés de

profundidade) do solo tipo a, cuja superfície tem uma variação sinódica de temperatura que vai de 25^0F em 1 de fevereiro (portanto, hemisfério norte) a 75^0F em 1 de agosto (média de 50^0F e amplitude de 25^0F) ligado a um sistema de troca térmica para aquecimento de ambiente que retira 7,1 Btu/h.ft durante o mês de outubro, 15,1 Btu/h.ft durante o mês de novembro, 23,5 Btu/h.ft em dezembro; 25,9 em janeiro; 23,0 em fevereiro e 18,4 Btu/h.ft em março.

Pelo método do espelho, teremos um tubo enterrado a 1,8 metros de profundidade (6') e outro eqüidistante acima da superfície do solo.

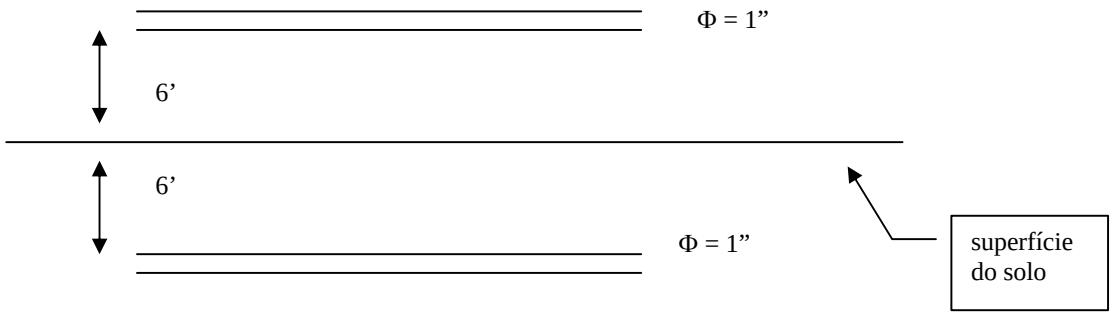


figura C.15 – Tubo enterrado no solo a 1,8 metros de profundidade (6 pés) e seu respectivo espelho simétrico à superfície do solo

A equação que dá o comportamento do solo sem interferência é dada por:

$$T_{solo} = A - T_0 e^{-x\sqrt{\frac{w}{2\alpha}}} \operatorname{sen}\left(\varphi_1 + wt - x\sqrt{\frac{w}{2\alpha}}\right) \qquad \text{(C.119)}$$

onde:

A = temperatura média do solo

x = 6' (1,8m)

φ_1 = fase inicial

t = tempo (t_{dias} x 24 horas)

$w = \frac{2\pi}{P} = \frac{2\pi}{8766 horas}$

α = difusividade do solo A = 0,0261 ft^2/h

$\therefore\ T_{solo} = 50 + 25.0{,}495.\text{sen}(0{,}0172t + 4{,}01)$ onde t é dado em dias

e:

$$T_{ar} = B + T_0\,\text{sen}(\varphi_2 + wt) \qquad \text{(C.120)}$$

onde:

B = temperatura média do ar

φ_2 = fase inicial

logo:

$$T_{ar} = 50 + 25.\text{sen}(4{,}71 + 7{,}16.10^{-4}.t)$$

que nos fornece a seguinte curva:

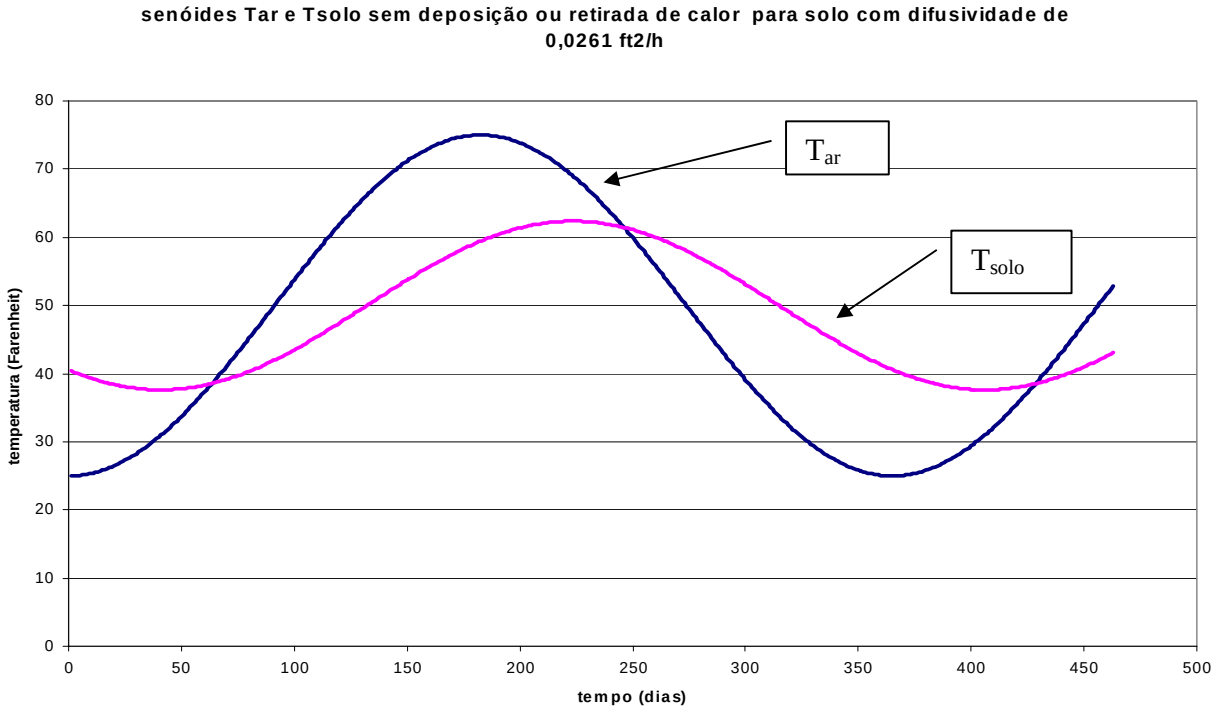


Figura C.16 – curvas de temperatura do solo e do ar para uma região com temperatura média 50^0F e amplitude de 25^0F e difusividade do solo de 0,0261 ft^2/h

As retiradas de energia térmica são calculadas de acordo com o período em que foram efetuadas, que neste caso se parecem com pedaços de onda quadrada:

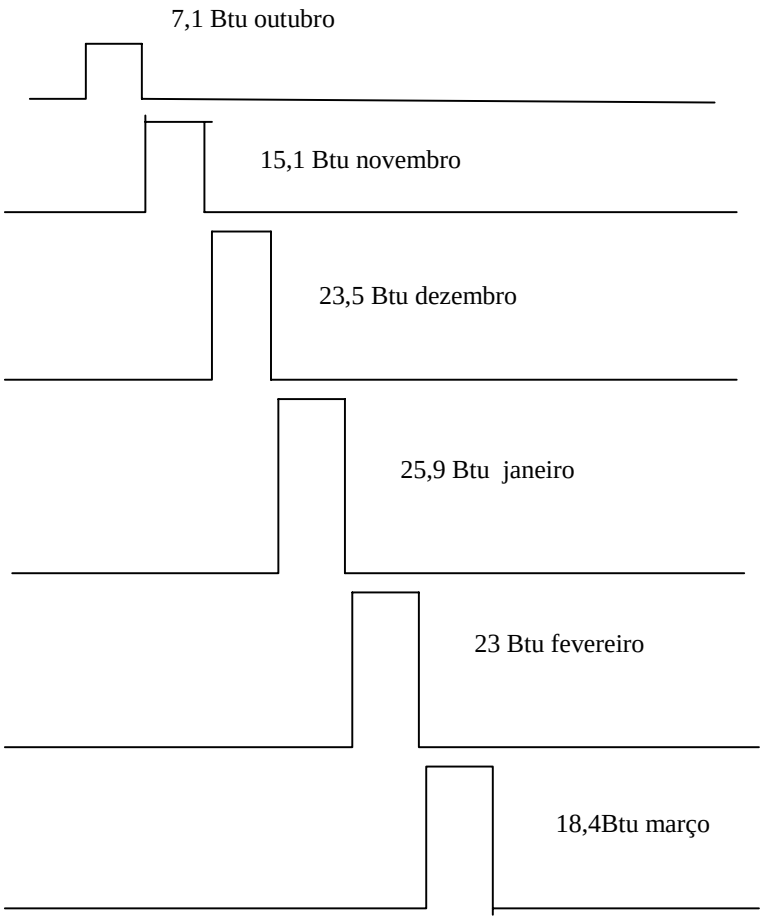


Figura C-17 taxas de absorção de calor do solo variáveis mês a mês, semelhantes a funções de onda quadrada

Aplicando-se então a **equação (C.90)** em cada intervalo, a queda de temperatura do solo mês a mês é dado por:

$$\Delta T_{1^0\,mês} = -\frac{7{,}1}{2\pi\kappa}\left[\left(I\left(\frac{0{,}0417}{2\sqrt{\alpha.6.31.24}}\right)-I\left(\frac{0{,}0417}{2\sqrt{\alpha.5.31.24}}\right)\right)-\left(I\left(\frac{12}{2\sqrt{\alpha.6.31.24}}\right)-I\left(\frac{12}{2\sqrt{\alpha.5.31.24}}\right)\right)\right]$$

(C.120)

$$\Delta T_{2meses} = \frac{1}{2\pi\kappa}\left\{7,I\left[I\left(\frac{0,0417}{2\sqrt{\alpha.60.24}}\right)-I\left(\frac{0,0417}{2\sqrt{\alpha.30.24}}\right)\right]+15,1\left[I\left(\frac{0,0417}{2\sqrt{\alpha.30.24}}\right)\right]\right\}-$$

$$-\ \frac{1}{2\pi\kappa}\left\{7,I\left[I\left(\frac{12}{2\sqrt{\alpha.60.24}}\right)-I\left(\frac{12}{2\sqrt{\alpha.30.24}}\right)\right]+15,1\left[I\left(\frac{12}{2\sqrt{\alpha.30.24}}\right)\right]\right\} \qquad \text{(C.121)}$$

.

.

.

$$\Delta T_{6^0\,mês} = \Delta T_{5^0\,mês} - \frac{18,4}{2\pi\kappa}\left[I\left(\frac{0,0417}{2\sqrt{\alpha.1.31.24}}\right)-I\left(\frac{12}{2\sqrt{\alpha.1.31.24}}\right)\right] \qquad \text{(C.122)}$$

provocando uma alteração na curva de temperatura do solo que é mostrado na figura C.18:

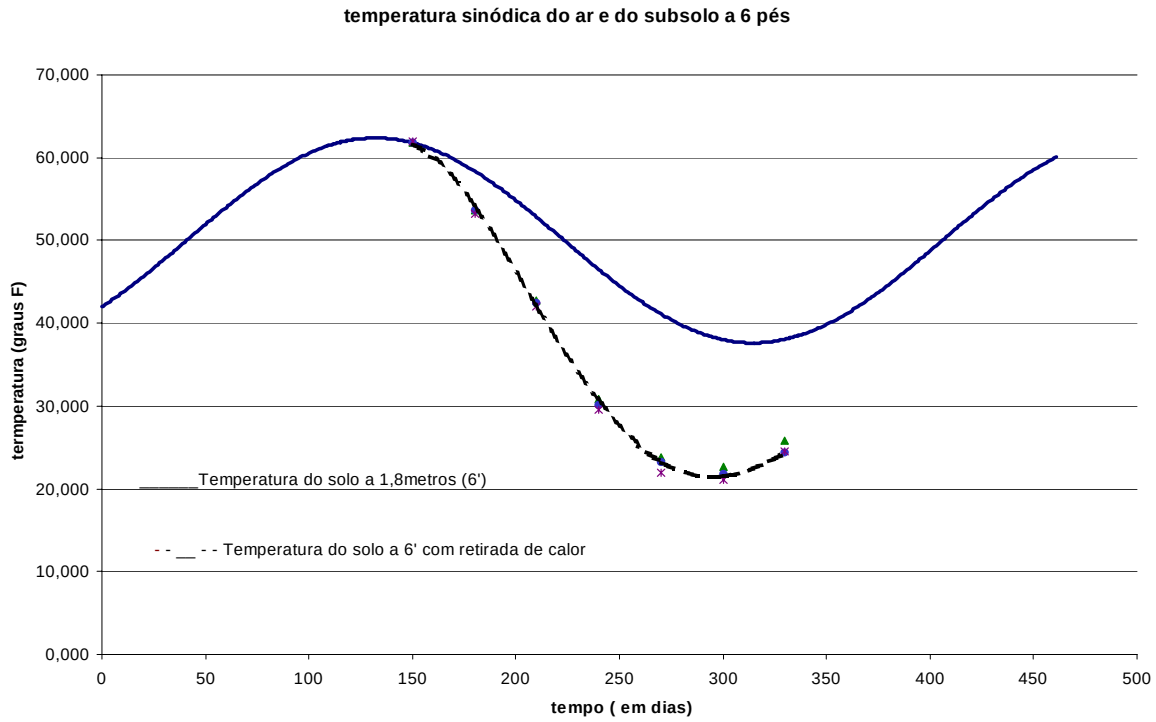


Figura C.18 Simulação do comportamento senoidal do solo sujeito apenas às variações climáticas e com retirada de calor com valores fixos e diferentes mês a mês, durante seis meses. Condições do solo descritas acima

Método para cálculo de Difusividade (α)

Wagley e Randolph, realizaram medidas de temperatura a várias profundidades, com o uso de termopares, ao longo de um período de 1 ano, ou 8766 horas. Com a obtenção das variações máximas de temperatura ao longo do ano no ponto 2 pés de profundidade (amplitude máxima de 34^0F) e outro em 22 pés (amplitude máxima de 4^0F), foi possível obter-se a difusividade α do solo, através da equação obtida a partir da solução da equação de Laplace em 1 dimensão que dá a máxima variação de temperatura:

$$T_R = 2T_0 e^{-x\sqrt{w/2\alpha}} = 2T_0 e^{-x\sqrt{\pi/\alpha P}} \qquad \text{(C.118)}$$

onde ***w*** foi substituído por $2\pi/P$
P é o período (8766 horas ou 1 ano)
T_R = range de temperatura (ou variação máxima) para um dado ponto sob a superfície
T_0 é a amplitude, ou metade da variação máxima de temperatura na superfície
x = profundidade (ou diferença de profundidades)
α = difusividade

O resultado obtido por este método (α = 0,028 ft^2/dia) está em bom acordo com outros métodos realizados para efeito de comparação, mostrando a validade do mesmo. A partir da difusividade é possível calcular-se a condutividade e o calor específico.

Efeito da Migração de Umidade do Solo

A difusão de umidade no solo das regiões mais quentes para as mais frias é bem conhecida e provavelmente é devido às diferenças de pressão de vapor de uma região para a outra. Em uma região com um tubo absorvedor de calor, a queda de temperatura provoca um aumento da umidade e, consequentemente, de sua condutividade. Ao contrário, nas proximidades de um tubo emissor de calor, deverá ocorrer uma queda de condutividade. A difusividade não

deverá ter uma alteração significativa, uma vez que o coeficiente de difusividade é dado por: $\alpha = \frac{\kappa}{c\rho}$

Ou seja, com o aumento da umidade deve-se observar também um aumento (ou diminuição) do calor específico e aumento (ou diminuição) da condutividade, de modo que os efeitos aproximadamente se anulam. Apesar da complexidade dos efeitos envolvidos nesta questão, é possível fazer-se uma avaliação grosseira da influencia da umidade nos sistemas de trocas térmicas por tubo.

A expressão para o gradiente de temperatura próximo de uma fonte linear é dada pela equação (C.91):

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\partial T}{\partial (r\eta)} \frac{\partial (r\eta)}{\partial r} = \frac{-Q'}{2\pi\kappa} \frac{e^{-r_1^2\eta^2}}{r_1\eta} \eta = -\frac{Q'}{2\pi\kappa r} e^{-r^2/4\alpha t} \qquad \text{(C. 91)}$$

Se o gradiente é plotado como função de *r* e integrado, o resultado é uma expressão que reduz-se à equação da integral de fonte linear (line source integral) :

$$T = \frac{S'}{2\pi\alpha} \int_{r\eta}^{\infty} \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta \equiv \frac{S'}{2\pi\alpha} I(r\eta) = \frac{Q'}{2\pi\kappa} I(r\eta) \qquad \text{(C.90)}$$

ou seja, a área sob a curva dá a diferença de temperatura. Se considerarmos que apenas a condutividade é alterada pela mudança da umidade e a difusividade é mantida constante, o novo gradiente pode ser plotado pelo aumento (ou redução) do gradiente original na mesma razão entre a velha e a nova condutividade.

Efeito do movimento de água do subsolo

Como demonstrado por **ING-54**, pp 269, o movimento de água no subsolo dá um efeito de aumento de troca térmica da ordem de 20% quando a velocidade da água é da ordem de 3 mm por hora e, para velocidades menores, este efeito é desprezível.